



# **3-VAIHEISEN TYRISTORISUUNTAAJAN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS**

Simo Rapo

Opinnäytetyö  
Marraskuu 2014  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

RAPO, SIMO:

3-vaiheisen tyristorisuuntaajan suunnittelu ja toteutus

Opinnäytetyö 105 sivua, joista liitteitä 4 sivua  
Marraskuu 2014

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa kolmivaiheinen tyristorisuuntaaja Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorion käyttöön. Työssä on selostettu vaihe vaiheelta laitteen koko suunnitteluelinkaari alustavista spesifikaatioista aina lopulliseen laitteistoon saakka.

Tyristorisuuntaajalla tarkoitetaan tässä yhteydessä laitetta, jonka avulla on mahdollista syöttää kolmivaiheisesta sähköverkosta tehoa DC-välipiiriin tai välipiiristä takaisin sähköverkkoon. Tehon suunta ja määrä ovat vapaasti aseteltavissa säätämällä tyristorisillan ohjauskulmaa. Tämän tyyppisiä laitteita on perinteisesti käytetty DC-moottorikäytöissä ja niiden jarrutusenergian talteenotossa. Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa laitteita käytetään useissa oppilastoissa.

Tässä työssä on käsitelty perinteistä verkkokommutoitua tyristorisuuntaajaa ja erityisesti tämän tyyppisen laitteen suunnittelunäkökohtia ja käytännön toteutusta. Työn erityisinä painoalueina ovat olleet prototyyppituotannon lisäksi laitteiston toimintavarmuuteen ja käyttöturvallisuuteen vaikuttavat näkökohdat, jotka tulee huomioida suunnitteluvaiheen aikana. Näiden lisäksi työssä on käyty läpi tyristorisuuntaajien teoriaa etenkin työssä toteutetun käytännön sovelluksen kannalta.

Työssä valmistettiin kaksi valmista yksikköä ja näihin varakortit tulevaisuuden huoltotarpeen varalta. Näiden yksiköiden ja varakorttien lisäksi laitteille laadittiin käyttöä ja huoltoa varten vaadittava dokumentaatio.

---

Asiasanat: tyristorisuuntaaja, kuusipulssikäyttö, tuotekehitys

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree programme in Electrical Engineering  
Option of Power Engineering

RAPO, SIMO:  
Design and Production of a 3-Phase Six-Pulse Drive

Bachelor's thesis 105 pages, appendices 4 pages  
November 2014

---

The purpose of this thesis was to design and produce a thyristor-based 3-phase six-pulse drive or controlled rectifier for use at Tampere University of Applied Sciences electrical laboratory. The scope of this thesis is the entire product development life cycle, from the initial specifications to the finished units.

A six-pulse drive as referred to in this context is a device which allows the transfer of electrical energy from a three phase mains power supply into a DC-bus or from the DC-bus back into the three phase mains supply. The direction and amount of power can be set freely by dialing the ignition angle of the thyristor bridge. These types of devices have been historically used in DC-motor drives and in their regenerative braking systems. The Tampere University of Applied Sciences electrical laboratory uses these devices in several student laboratory exercises.

This thesis deals with conventional grid commutated drives and the design aspects and practical considerations thereof. Special consideration is given to reliability and safety factors that need to be taken into account in the design process. Further attention is given to the theory of thyristor drives in relation to the practical applications explored in this thesis.

Two functional units and the necessary spare parts for their long term maintenance were produced as a part of this project. The requisite user guides and maintenance documentation for the two units were also produced.

---

Key words: controlled rectifier, thyristor, six-pulse drive, product development

## SISÄLLYS

1	ESIPUHE .....	7
2	JOHDANTO .....	8
3	TYRISTORITEKNIIKAN LYHYT OPPIMÄÄRÄ .....	10
3.1	Tyristorien ominaisuuksia.....	10
3.2	Hilaohjaus .....	12
3.3	Siltakytkentöjen topologiat .....	15
3.4	Ohjausloisteho ja yliaallot.....	21
3.5	Tyristoritekniologia tänään .....	24
4	ALUSTAVA SUUNNITTELU .....	25
4.1	Tehoaste .....	25
4.2	Pulssimuuntajien mitoitus.....	26
4.3	Kotelointi .....	28
5	ENSIMMÄINEN PROTOTYYPPI .....	29
6	TOINEN PROTOTYYPPI.....	32
6.1	Yksivaiheisen ohjauskortin suunnittelu.....	32
6.2	Pulssimuuntajien rakentaminen .....	34
6.3	Prototyypin koestus.....	36
7	KOLMIVAIHEINEN PROTOTYYPPI .....	40
7.1	Tahdistusmuuntajat.....	40
7.2	Sytytysyksikkö ja muuntajakortti.....	43
7.3	Tehoaste .....	46
7.3.1	RC -suojan mitoitus .....	47
7.4	Prototyypin koestaminen.....	52
8	TUOTANTOVERSION TOTEUTUS.....	59
8.1	Piirikorttien CAD -mallit .....	59
8.2	"Nollasarja" .....	61
8.3	Sytytysyksikkö – "Luna" .....	63
8.3.1	Sytytysyksikön koestus ja kalibrointi.....	66
8.4	Tahdistuskortti – "Sol Invictus" .....	67
8.4.1	Tahdistuskortin koestus.....	68
8.5	Järjestelmän lohko- ja pulssikaavio.....	68
9	LAITTEISTOJEN KOKOONPANO.....	72
9.1	Komponenttisijoittelu .....	73
9.2	Lämmönhallinta.....	74
9.3	Etupaneeli .....	75
10	SUOJAUSTEN KALIBROINTI JA KOESTUS .....	76

10.1 Ylivirtasuojaja .....	76
10.2 Ylilämpösuojaja .....	76
10.3 Alijännitesuojaus.....	77
10.4 Vaihevika .....	77
11 KÄYTTÖKOKEET .....	78
11.1 Tasasuuntaus .....	78
11.1.1 Ohjauskulma 18°.....	79
11.1.2 Ohjauskulma 60°.....	82
11.2 Moottorikäyttö .....	84
11.2.1 Ohjauskulma 18°.....	86
11.2.2 Ohjauskulma 60°.....	87
11.3 Tasa- vaihtosuuntaustyö.....	89
11.3.1 Ohjauskulma 110 / 60°.....	91
11.3.2 Ohjauskulma 160 / 18°.....	93
11.3.3 Ohjauskulma 18 / 160°.....	95
12 SFS-EN 61010-1:2011 MUKAINEN KOESTUS.....	98
13 POHDINTA .....	99
LÄHTEET .....	101
LIITTEET .....	102
Liite 1. Semikron SKKT57/16E tyristorimoduulin datalehti. ....	102
Liite 2. Muuntajien kytkentäryhmät.....	103
Liite 3. Tarkastuspöytäkirja, suuntaaja 1 .....	104
Liite 4. Tarkastuspöytäkirja, suuntaaja 2.....	105

**ERITYISSANASTO**

Tyristori	Liipaistava tehopuolijohde
Pulssimuuntaja	Muuntaja, jolla toteutetaan ohjaavan piirin ja tehoasteen välinen galvaaninen erotus
Kommutointi	Puolijohteen johtavuustilan muutos; Virran siirtyminen puolijohteelta toiselle siltakytkennässä
Kommutointihetki	Tehopuolijohteen johtavuustilan muutoksen ajanhetki verkkoasteina
Ohjauskulma	Tyristorin liipaisun viivästys asteina luonnollisesta kommutointihetkestä lukien
Pitovirta	Minimikatodivirta, jonka tyristori tyypillisesti tarvitsee pysyäkseen johtavassa tilassa.
FR-4	Lasikuitupohjainen piirikorttilaminaatti
UVLO	<i>Under Voltage Lock-Out</i> ; Alijännitesuojaus
EDA	<i>Electronic Design Automation</i> ; Elektroniikan suunnittelusovellukset
DFM	<i>Design for Manufacture</i> ; Tuotantokelpoinen suunnittelu

## 1 ESIPUHE

Haluan osoittaa kiitokseni Tampereen ammattikorkeakoulun sähköosaston henkilökunnalle ja opiskelijatovereilleni kuluneesta neljästä ja puolesta vuodesta. Samaten haluan kiittää kaikkia osallisia siitä luottamuksesta, josta sain nauttia tätä työtä suorittaessa ja siitä, että sain ylipäättään alkaa toteuttamaan näin haastavaa projektia. Erityinen kiitos kuuluu Klaus Virtaselle työn ohjauksesta ja lukemattomista konsultointiin käytetyistä tunteista. Ilman hänen ammattitaitoaan ja jatkuvaa palautettaan tämä työ ei olisi ollut mahdollinen. Tämä on ollut raskas vuosi, mutta jos tätä työtä tarjottaisiin nyt, tekisin saman virheen uudelleen.

On niin monia, joita haluaisin kiittää, mutta se ei ole tässä mahdollista. Ehkäpä siis riittääkin, että Te tiedätte keitä olette. Tiedän sen olevan laiha lohtu, sillä velkani on niin monessa suhteessa korvaamaton.

Tietäkää siis, että tämä kiitos kuuluu Teistä jokaiselle, myös – ja erityisesti – Teille, jotka ette tule tätä koskaan lukemaan. Missä ikinä olettekaan,

Kiitos

Simo Johannes Rapo

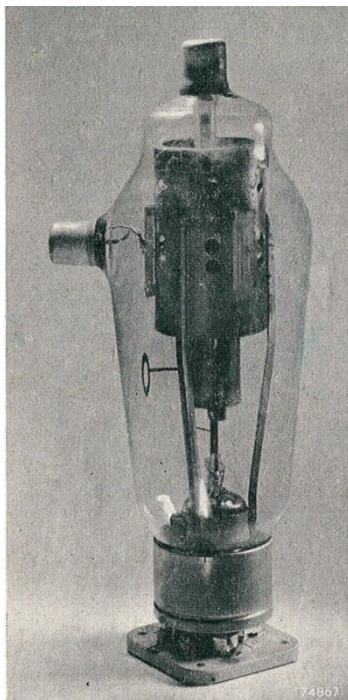
Tampereella 27.11.2014

## 2 JOHDANTO

Suuntaajalla tarkoitetaan yleisesti siltakytkentää, jonka avulla on mahdollista muuntaa energiaa sähkölajista toiseen. Tällainen silta voidaan toteuttaa monin eri tavoin: Nykyisin käyttäen puolijohteita tai aikaisemmin elektroniputkia, tai pyörivien koneiden tapauksessa mekaanisen kommutaattorin avulla.

Suuntaajien käyttökohteet teollisuudessa ja kuluttajasektorilla jakautuvat erilaisiin tasasuuntaus ja vaihtosuuntauskäyttöihin. Lähes jokainen sähköverkkoon kytkeytyvä laite sisältää jonkinlaisen suuntaajan tuloasteessaan. Erilaiset suuntaajakäytöt ovat mahdollistaneet pienempien ja energiatehokkaampien laitteiden kehittymisen aina 1960-luvulta lähtien.

Tyristoripohjaiset suuntaajat korvasivat aikaisemmin käytetyn elektroniputkiteknologian kuten erilaiset elohopeakaarisuuntaajat ja *tyratronit* teollisuuden DC-käytöissä 60-luvun puolivälistä lähtien. Tyristorin nimi juontaakin juuri tyratroneista, joiden toimintaa ne suurin piirtein vastaavat. Kuvassa 1 on perinteinen tyratroniputki (Kretzmann, 1953).



KUVA 1. Philips PL105 Tetrodityatroni



Jo varhaiset tyristorit olivat kompakteja ja energiatehokkaita edeltäneeseen putkitekniikkaan verrattuna. Lisäksi ne olivat kestäviä niin mekaanisia kuin sähköisiä rasituksia vastaan ja niiden elinikä oli kertaluokkaa putkia pidempi. Myös valmistuskustannukset tulivat nopeasti alas teknologian kypsyessä ja siten myös hinnat halpenivat, jolloin ne nopeasti korvasivatkin elektroniputkitekniikan matalataajuuksisissa käytöissä täysin. Kuvassa 2 on esitettynä erilaisia tyristoreja, sisältäen niin moderneja kuin vanhempia kotelotyypppejä.



KUVA 2. Erilaisia tyristoreja

Kuvassa 2 olevat laitteet ovat vasemmalta oikealle lukien: Tässä työssä käytetty *Semikron SKKT 57/16E*, *Eupec T80F10VEC*, *International Rectifier S282C*, *AEG T128F1200*, *General Electric ZJ502*, *American Microsemiconductor ST040S12P*, *ST Microelectronics S1610DH*. (AEG -tyypit: AEG-TELEFUNKEN Thyristoren, Triacs, 1977.)

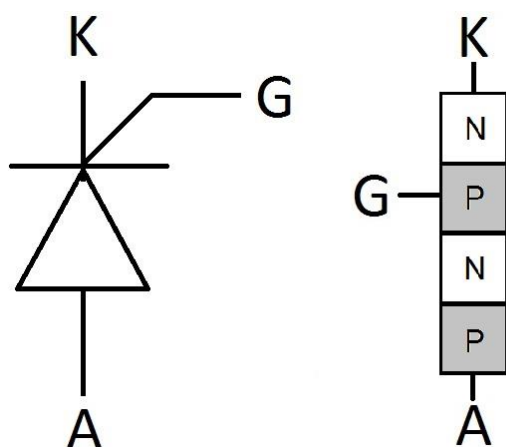
Puolijohdeteknologian kehitys on ollut nopeaa koko 1900-luvun toisen puoliskon ja 2000-luvun alun ajan ja siten myös tyristoritekniikka on jo monissa käyttökohteissa korvautunut uusilla ja entistä paremmilla ratkaisuilla. Silti, tälle teknologialle on yhä omat käyttötarkoituksensa, kuten suurjännitteiset käytöt, joita ei ainakaan vielä voida suoraan korvata millään muulla teknologialla. Täten tyristoritekniikan tuntemus on edelleen hyödyllistä – nyt ja tulevaisuudessa.

### 3 TYRISTORITEKNIIKAN LYHYT OPPIMÄÄRÄ

Jotta voitaisiin ymmärtää paremmin työssä käytettyä teknologiaa, on järkevää tutustua ensin käytettyjen teholaitteiden ominaisuuksiin. Siksi tässä osassa käydään läpi ko. teknologian käyttökohteita ja yleisiä ominaisuuksia, jotka tulee ymmärtää siirryttäessä itse laitteiston suunnitteluun ja toteutukseen.

#### 3.1 Tyristorien ominaisuuksia

Tavanomainen tyristori sisältää kaksi peräkkäistä PN-liitosta ja vastaa ominaisuuksiltaan hyvin pitkälti piipohjaista puolijohdediodia. Diodin tavoin tyristorin puolijohdeliitos johtaa vain päästösuuntaan ja sillä on ominainen kynnysjännite, joka vaihtelee laitteesta riippuen alle voltista kymmeniin voltteihin. Puolijohteen kynnysjännite pysyy jotakuinkin vakiona kuormituksesta riippumatta ja täten tyristorin häviöteho määräytyy lineaarisesti virtaan nähden; kaksinkertainen virta tarkoittaa kaksinkertaista häviötehoa. Kuitenkin, diodin tavoin, myös tyristorien lämpötilakerroin on yleensä negatiivinen. Täten liitoksen kynnysjännite ja siten myös sen häviöteho putoaa hieman teholaitteen lämmetessä. Myös tyristorin piirrosmerkki on hyvin samankaltainen kuin diodilla, sillä erotuksella, että tyristorin merkissä on ylimääräinen johdin, joka kuvaa laitteen ohjaushilaa (kuva 3).



KUVA 3. Tyristorin piirrosmerkki ja periaatteellinen rakenne

A: Anodi, K: Katodi, G: Hila

Tyristorit voidaan jakaa karkeasti kahteen eri ryhmään: Kertaliipaistaviin ja GTO-tyyppeihin. Kertaliipaistava tyristori syttyy johtavaksi kun se saa hilalleen positiivisen ohjauspulssin ja sammuu laitteen läpi kulkevan virran laskiessa alle sen ominaisen pitovirtarajan. Tämän tyypin laitteita käytetään verkkokommutoituissa käytöissä, mikä tarkoittaa sitä, että vaihtosähköverkon luonnollinen virran kääntyminen aiheuttaa tyristorin sammuttamisen. Verkkokommutoitu tyristorisuuntaaja ei siten voikaan toimia ilman ulkoista verkkoa, eikä siten sovellu esimerkiksi varavoimasovelluksiin. Toisaalta, ominaisuus voi olla myös toivottava tietyissä sovelluksissa, esimerkiksi kytkettäessä sähkön pientuotantoa verkkoon. Tässä työssä käsitellään tavallisia verkkokommutoituja laitteita.

GTO-tyristori poikkeaa edellä mainituista siinä, että se voidaan tarvittaessa myös sammuttaa antamalla hilalle negatiivinen pulssi. GTO-nimitys tulee sanoista *Gate Turn Off*. GTO-tyristorit kykenevät yleensä nopeampiin kytkentätaajuuksiin, mutta ovat silti todella hitaita verrattuna kehittyneempiin tehopuolijohteisiin (MOSFET, IGBT, jne.) verrattuna. Tavanomaisia käyttökohteita tämän tyypin laitteille ovat erittäin suuritehoiset ja suhteellisen hitaat AC-moottorikäytöt.

Tyristorit tarjoavat kokoonsa verrattuna todella suuren kytkentäkapasiteetin. Esimerkiksi kuvan 2 pitkällä katodijohtimella varustettu Eupec T80F kestää 200 ampeerin jatkuvan anodivirran ja sen estojännitekestoisuus on 1000 V. Tehokaimmat markkinoilla olevat laitteet kestävät tuhansien volttien estojännitteen ja samaten tuhansien ampeerien virran. Useimmissa käyttötarkoituksissa laitteen virtakestoisuus ei olekaan ongelma, mutta jännitekestoisuuteen tulee kiinnittää huomiota. Tämä on tavallista tehopuolijohteiden maailmassa, missä virta on halpaa, mutta estojännite maksaa. Asetelma on käänteinen aikaisempaan putkitekniikkaan verrattuna, missä jännitekesto oli ilmaista mutta virtakestoisuus hyvin kallista.

Koska tyristoreissa käytetty puolijohdeliitos on yleisesti suhteellisen suuri verrattuna muihin tehopuolijohteisiin, on tyristoreille ominaista suuri terminen oikosulkuvirrankesto; Korkea oikosulkuvirrankesto on seurausta puolijohde-elementin suuresta lämpökapasiteetista. Koska puolijohdeliitoksella on paljon termistä inertiaa, on sen lämpenemisen aikavakio huomattavasti suurempi kuin pie-

nemmillä liitoksilla toteutetuissa puolijohteissa (BJT, IGBT, MOSFET ja näiden variantit).

Tyristorien tapauksessa maksimioikosulkuvirta on yleensä ilmoitettu yhden verkkojännitteen puolijakson ajalle tietyssä liitoslämpötilassa (10 ms 50 Hz verkolle, 8,33 ms 60 Hz verkolle, liitoslämpötilan ollessa joko 25 °C tai 125 °C). Normaali ylivirtakestoisuus on noin kymmenkertainen laitteen nimellisvirtaan nähden – 100 ampeerin laitteen voidaan melko turvallisesti olettaa kestävän 1000 ampeerin oikosulkuvirran yhden puolijakson ajan. Käytännössä arvot ovat monesti vielä tätäkin suurempia. Esimerkiksi tässä työssä käytetty, nimellisesti 57 ampeerinen SKKT57/16E kestää 125 °C liitoslämpötilassa 1250 A vikavirran 10 ms ajan valmistajan ilmoittamien tietojen mukaan.

### 3.2 Hilaohjaus

Tavallinen puolijohdediodi tulee johtavaksi heti, kun jännite sen ylitse muuttuu päästösuuntaiseksi ja diodin kynnysjännite ylittyy. Tyristori ei kuitenkaan lähde diodin tavoin johtamaan heti kun sen päästösuuntainen kynnysjännite ylittyy, vaan se tarvitsee lisäksi hilalleen positiivisen ohjauspulssin. Tätä ohjauspulssia kutsutaan yleisesti liipaisu- tai sytytyspulssiksi. Jos anodijännitteen nousunopeus on hyvin suuri, voi tyristori tosin myös liipaistua virheellisesti itsestään.

Vaikka tyristori teoriassa tarvitsee vain yhden hyvin nopean pulssin liipaistuaakseen, käytännössä teollisuuden sovelluksissa tyristoreja ohjataan ampumalla hilalle usean kilohertsin kampa-aaltoa koko, tai lähes koko, halutun johtokulman ajan. Kampa-aallon taajuus ja pulssinleveys vaihtelevat ohjattavien tyristorien mukaan, mutta yleisesti käytetään noin 1...10 kHz signaalia pulssinleveyden ollessa noin 10...20 µs luokkaa. Tällä tavalla varmistetaan tyristorin liipaistuminen; Jos ensimmäinen hilapulssi ei vielä sytytä laitetta, jokin seuraavista tekee sen. Tällä tekniikalla on erityisen suuri merkitys silloin, jos tyristori on halutulla ohjaushetkellä jostain syystä biasoituna estosuuntaiseksi, tai virta ei muusta syystä voi vielä lähteä johtamaan laitteen läpi. Esimerkiksi ajettaessa induktiivista kuormaa tällainen tilanne on hyvinkin mahdollinen.

Edullisissa lampunhimentimissä ja vastaavissa kuluttajasektorin sovelluksissa ei yleensä käytetä tämän tyyppistä sytytysjärjestelyä, sillä yksittäinen pulssi on huomattavasti edullisempi ja helpompi generoida ja tälläkin tekniikalla saavutetaan näissä kohteissa riittävä liipaisuherkkyys, etenkin ajettaessa puhtaan resistiivisiä kuormituksia.

Tyristorihjausten yhteydessä puhutaan monesti ohjauskulmasta, jolla tarkoitetaan luonnollisen kommutointihetken, ts. verkkojännitteen nollakohdan ja varsinaisen ohjaushetken välistä eroa. Voitaisiin puhua myös suoraan aikaviiveestä millisekunteina, mutta vaihtosähkön tapauksessa on luontevampaa puhua asteista, sillä tämä suure ei ole riippuvainen sähkön taajuudesta. Teoreettinen ohjauskulma-alue tyristorisuuntaajalle on  $0^\circ \dots 180^\circ$ , mikä on yhden verkkotaajuuksisen puolijakson kesto. Näin ollen  $0^\circ$  vastaa täyttä tasasuuntausta ja  $180^\circ$  täyttä vaihtosuuntausta. Käytännössä ohjauskulma on kuitenkin usein rajoitettu teknisistä syistä alueelle  $18^\circ \dots 162^\circ$ , joskus pienemmällekin; Tässä työssä rakennettavan laitteiston ohjauskulma-alue on noin  $20^\circ \dots 160^\circ$ .

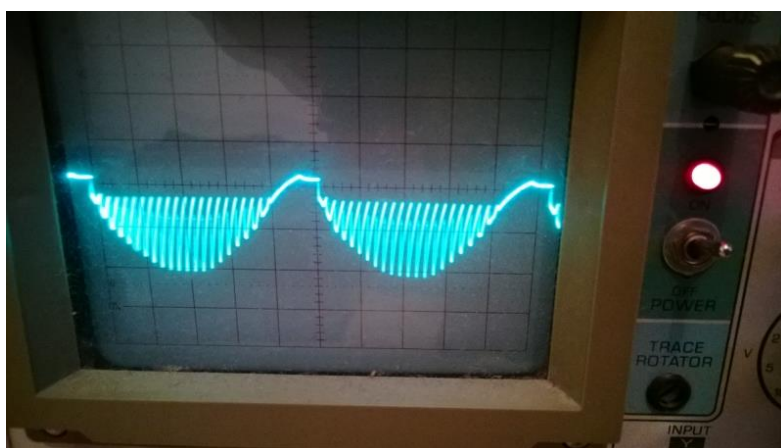
Kun laitteen johtamista viivästytetään tällä tavalla, puhutaan ohjauskulmasäädöstä. Tyristorin hyödyllisyys tehonohjauskomponenttina kumpuaa juuri tästä mahdollisuudesta viivästyttää laitteen johtamista. Tasasuuntauskäytössä viivästetty ohjauskulma muodostaa pienemmän tehollisen jännitteen kuorman yli, jolloin kuormalle syötetty teho luonnollisesti laskee.

Koska ohjauspulssit tulee syöttää suoraan tyristorin hilalle, joka on puolestaan yhteydessä teholaitteen katodiin, on myös ohjaushila katodipiirin potentiaalissa. Tämä tulee ottaa huomioon hila-ajurin suunnittelussa, sillä ohjattaessa 230 V tai 400 V sähköverkkoa, myös tyristorin hila on samassa korkeassa potentiaalissa. Hila-ajopiiriin tulee siten joko olla kelluva, ts. eristetty maasta, jolloin koko ajuri tulee katodin kanssa samaan potentiaaliin, tai vaihtoehtoisesti sytytyspulssien syöttö täytyy toteuttaa jonkinlaisen potentiaalivapaan järjestelyn kautta.

Ellei kelluvan ajopiirin käytölle ole jotain erityistä teknistä tai taloudellista syytä, on toivottavaa käyttää eristettyä ohjaustapaa. Käytännössä yleisin tapa tämän toteuttamiseen on pulssimuuntajan käyttö. Muuntaja tekee galvaanisen erotuksen ajopiiriin ja tyristorin hilan välille, jolloin matalajännitteinen ohjauspiiri ei ole

enää yhteydessä korkeajännitteiseen tyristoripiiriin. Tarvittaessa suurempia liipaisuvirtoja voidaan käyttää myös optista erotusta, jossa erillinen hakkuritehonlähde syöttää hilapiiriä ja ohjaustieto tuodaan sisään optoeristimen kautta. Näiden kahden tavanomaisen hila-ajotopologian lisäksi on myös eksoottisempia ratkaisuja, joita ei kuitenkaan ole järkevää käydä tässä läpi.

Yllä läpikäytyjen kohtien lisäksi on huomioitava, että jokaisella tyristorityypillä on sille ominainen pitovirta,  $I_h$ , jonka alapuolella teholaite ei pysy liipaistussa tilassa; Mikäli johtavaksi liipaistun tyristorin virta putoaa alle sille ominaisen kynnysvirran, tyristori siirtyy johtamattomaan tilaan. Vaadittavan pitovirran arvo riippuu tyristorityypistä ja sen teholuokasta, mutta käytännössä se vaihtelee joistain milliampeereista useisiin ampeereihin. Kuvassa 4 on esitettyä yksivaiheisen ohjatun tasasuuntaajan DC-jännite käyttötilanteessa, jossa kuormitus ei ole riittävä pitämään tyristoreja liipaistussa tilassa.



KUVA 4. DC-jännitteen verhoikäyrä kun  $I < I_h$ . 1:10 vaimennus, 2ms/div, 1V/div Y-vahvistin

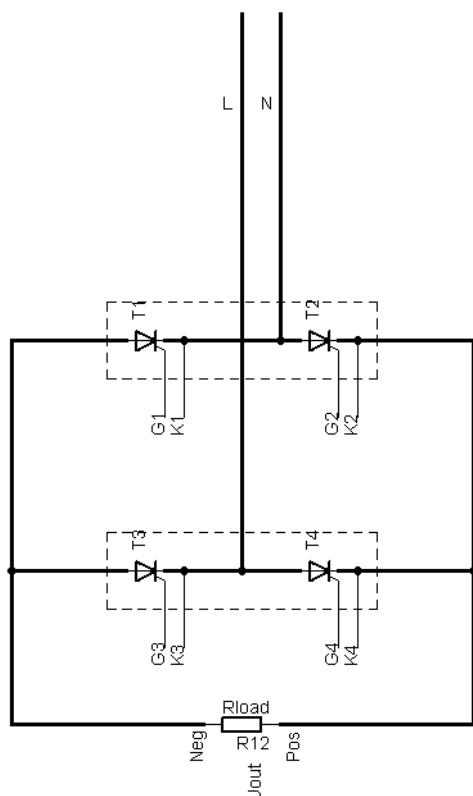
Kuvasta 4 käy ilmi, että tyristori tulee johtavaksi aina hilapulssin saapuessa, mutta ei pysy johtavassa tilassa enää pulssin poistuessa. Täten hilapulssitus näkyy 4 kHz:n verhoikäyränä lopullisen 100 Hz:n taajuudella sykkivän DC-jännitteen päällä. Tämän kaltainen korkeataajuuksinen pulssitus aiheuttaa ylimääräisiä kytkentähäviöitä teholaitteissa ja voi kuulua voimakkaana sirinänä tehomagnetikan käämityksissä. Kuvan 4 mukainen tilanne on epätoivottava ja voi aiheuttaa vaurioita teholaitteille tai niiden oheiskomponenteille.

Tyristorin luotettavalle liipaisulle on olemassa karkeasti jaoteltuna 4 ehtoa. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Julkaisu 12 - 71, 1971.)

1. Tyristorin tulee olla biasoituna päästösuuntaan
2. Hilapulssin amplitudin ja keston on oltava riittävä
3. Tyristorin katodivirran nousunopeuden tulee olla riittävä
4. Katodivirran tulee olla suurempi kuin ohjattavalle teholaitteelle ominainen pitovirta.

### 3.3 Siltakytkentöjen topologiat

Tyristoreilla voidaan toteuttaa useita erilaisia siltakytkentöjä. Tämän työn kannalta kiinnostavia topologioita ovat yksi- ja kolmivaiheiset koko- ja puoliaaltoiset sillat. Näistä on järkevää käydä läpi erityisesti kokoaaltoiset variantit, sillä puoliaaltoiset kytkennät eivät suoranaisesti liity tämän työn toteutukseen. Kuvassa 5 nähdään yksivaiheisen kokoaaltoisen tasasuuntaussillan periaatekuva.



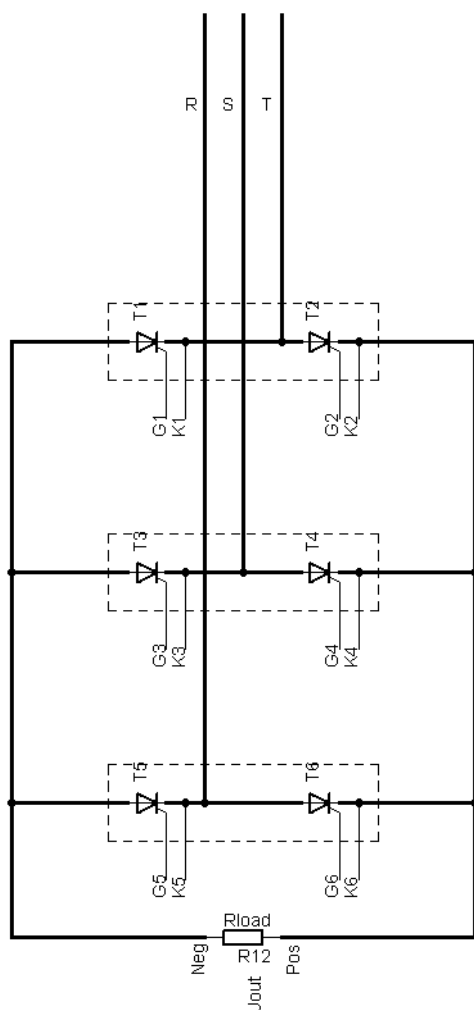
KUVA 5. 1-vaiheinen tyristoripohjainen tasasuuntaussilta

Tämän tyyppisen sillan kommutointijärjestys on yksiselitteinen: sillassa on aina johtovuorossa kaksi teholaitetta, jotka vaihtuvat 180 verkkoasteen välein. Kuvassa 5 esitetyssä sillassa johtovuorossa vaiheen L positiivisen puolijakson aikana olisivat tyristorit T1 ja T4, negatiivisen puolijakson aikana puolestaan T2 ja T3.

Säätämällä tyristorien ohjauskulmaa voidaan DC-jännitteen tasoa muuttaa ja tällä tavalla voidaan toteuttaa esimerkiksi kuorman pehmeä käynnistys. Tämän tyyppinen kytkentä on hyödyllinen silloin, kun DC-piirissä on paljon suodatuskapasitanssia. Säätämällä jännite pehmeästi nolasta maksimiin voidaan välttää muuten syntyvä kytkentävirtasysäys, joka syntyy kun tyhjä kondensaattori latautuu nopeasti jännitteen kytkeytyessä päälle.

Puhtaassa tasasuuntauskäytössä voidaan kunkin haaran toinen tyristori korvata normaalilla diodilla, jolloin säästetään hieman teholaitteiden ajovaatimuksissa. Tällöin tyristorin liipaistuminen aiheuttaa myös sitä vastaavan diodin johtavuustilan muutoksen. Tähän tarkoitukseen on saatavilla valmiita tyristori- diodimoduuleita. Tyristorisilta voidaan toteuttaa myös kolmivaiheisena, kuten kuvassa 6 on esitetty.





KUVA 6. Kolmivaiheinen kokoaaltosilta

Kolmivaiheinen siltakytkentä ei eroa ulkoisesti yksivaiheisesta vastikkeestaan muutoin, kuin yhden lisätyn teholaiteparin osalta. Näin ollen jokaiselle vaiheelle tulee oma tyristoriparinsa, joiden avulla kunkin vaiheen eri puolijaksot voidaan tasasuunnata. Kuten aiemmin, puhtaassa tasasuuntauskäytössä voidaan toisen haaran tyristorit korvata diodeilla, jolloin voidaan jälleen kerran hieman keventää sillan ajovaatimuksia ja teholaitteiden aiheuttamia kustannuksia.

Kuusipulssisillan kommutointijärjestys ei kuitenkaan ole aivan yhtä yksiselitteinen kuin yksivaiheisen sillan tapauksessa – joskin yhä johtovuorossa on kerrallaan kaksi teholaitetta – sillä kukin teholaite johtaa vain 120 verkkoastetta ja kommutointi tapahtuu 60 verkkoasteen välein. Täten jokaisen johtovuorossa

olevan laitteen vastahaaran kommutointi tapahtuu  $60^\circ$  välein. Kuvan 6 mukaisen sillan kommutointijärjestys on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Kommutointijärjestys

Johtovuoro	Verkkoasteet R-vaihe	Verkkoasteet (Pääjännite)	Aika (ms)
T3, T6	$30^\circ$	$0^\circ (360^\circ)$	1,66
T6, T1	$90^\circ$	$60^\circ$	5
T1, T4	$150^\circ$	$120^\circ$	8,33
T4, T5	$210^\circ$	$180^\circ$	11,66
T5, T2	$270^\circ$	$240^\circ$	15
T2, T3	$330^\circ$	$300^\circ$	18,33

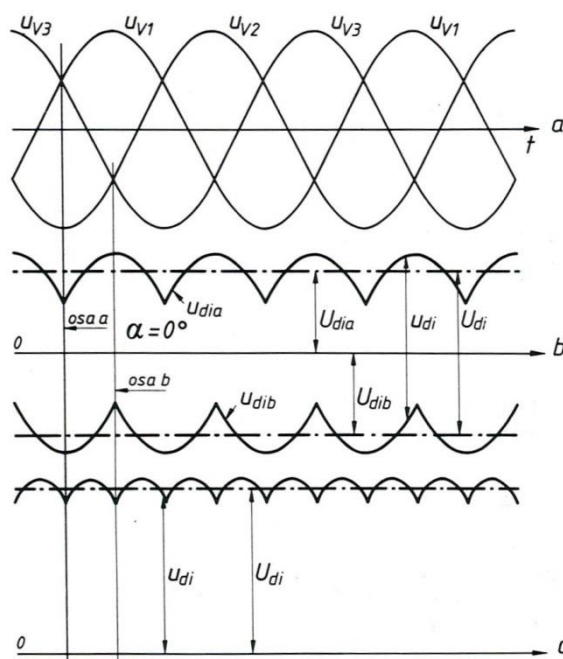
Taulukon 1. perusteella voidaan muodostaa esitys, jossa eri teholaitteiden johtovuorot ja kommutoinnit ovat esitettynä lineaarisena janana. Tämä on esitetty taulukossa 2, jossa kulma vastaa syöttävän verkon R-vaiheen kulmaa.

TAULUKKO 2. Kommutointijärjestys lineaarisena esityksenä

Verkkoasteet	$30^\circ$	$90^\circ$	$150^\circ$	$210^\circ$	$270^\circ$	$330^\circ$
Alahaara	T3	T1	T1	T5	T5	T3
Ylähaara	T6	T6	T4	T4	T2	T2

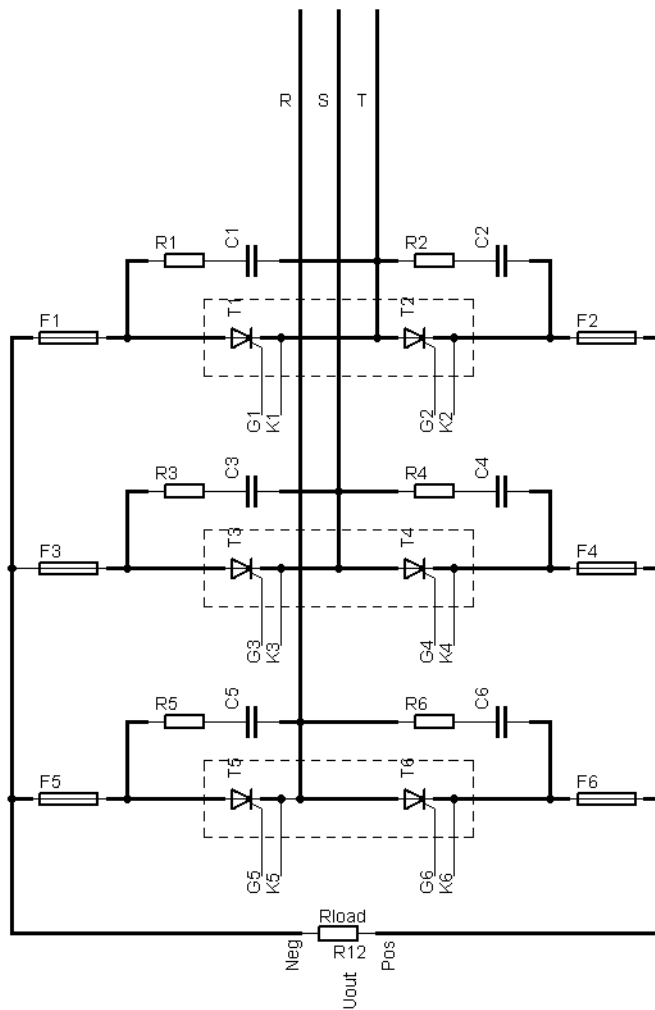
Kuvan 6 mukaisia siltoja kutsutaan topologiaaltaan kuusipulssisiksi ja laitteita itseään kuusipulssisilloiksi, sillä DC-jännitteessä on jokaisen verkkojakson aikana kuusi selvää huippua (kuva 7).

Kuva 52.12. Kolmivaihesillan jännitteet ja virrat.  
 a. Vaihtojännite.  
 b.  $\alpha = 0$ . Osajännitteet  $u_{dia}$  ja  $u_{dib}$  sekä  $U_{dia}$  ja  $U_{dib}$ .  
 c.  $\alpha = 0$ . Suuntaajan tasajännitteen hetkellisarvon vaihtelu. Tasajännitteen keskiarvo.



KUVA 7. 6-pulssisillan vaihe-, osa- ja DC-jännitteet (Paavola, Lehtinen, 1984, 384.)

Edellä esitelty yksinkertainen kytkentä ei ole sellaisenaan soveltuva tosimaailman sovelluksiin. Kytkeentään tulee lisätä vielä tyristorien ylitse kytkeytyvät RC-suojat, joita käsitellään syvällisemmin tämän työn luvussa 7.4.1, sekä jokainen virtahaara tulee suojata omalla nopealla puolijohdesulakkeellaan, tai vastaavalla nopealla ylivirtasuojauksella (Uotila, R. Diplomityö, 1971). Kytkeentä voidaan tällöin toteuttaa kuvan 8 mukaisesti.



KUVA 8. Kokoaaltainen kolmivaihesilta tukikomponentteineen

Kuvan 8 mukainen kytkentä soveltuu puhtaan tasasuuntauksen lisäksi myös vaihtosuuntauskäyttöön. Historiallisesti varsin tavanomainen käyttötilanne tällaiselle sillalle onkin DC-moottorin ohjaus esimerkiksi hissi- tai nosturikäytöissä. Ohjauskulma-alueella  $0^\circ \dots 90^\circ$  silta toimii tasasuuntaajana siten, että pienempi ohjauskulma vastaa suurempaa DC-kiskon jännitettä. Tällöin silta syöttää tehoa moottorikuormalle. Kun ohjauskulma tuodaan  $90^\circ$ :een, on DC-kiskon jännitteen integraali 0 V, jolloin pätötehoa ei välity. Jos ohjauskulmaa kasvatetaan tästä, siirtyy silta vaihtosuuntauskäyttöön. Ohjauskulma-alueella  $90^\circ \dots 180^\circ$  on DC-kiskon lähdejännite negatiivinen siten, että suurempi ohjauskulma vastaa suurempaa negatiivista jännitettä. Tällä ohjausalueella moottori toimii generaattorina ja tehon suunta on moottorilta verkkoon päin, jolloin moottori jarruttaa. Kun moottori on jarrutettu pysähdyksiin, ei pätötehoa luonnollisesti siirry enää mihinkään suuntaan. Tällöin puhutaan ns. kaksikvadranttikäytöstä.



Kuvasta 9 käy ilmi, että sillan ohjauskulman ollessa pieni, on myös virran ja jännitteen osoittimien välinen erokulma vähäinen, jolloin loistehokomponentti on vastaavasti myös vähäinen. Ohjauskulman ollessa  $90^\circ$  on virran ja jännitteen välinen erokulma maksimissaan, jolloin kaikki verkosta otettu teho on loistehoa. Ajettaessa siltaa vaihtosuuntauskäytössä on virta yhä jännitettä jäljessä, joten silta ottaa aina induktiivista ohjausloistehoa verkosta.

Hieman erikoisesti siis myös puhtaasti resistiivisesti kuormitettu suuntaaja ottaa verkosta loistehoa, tehokertoimen määrytyessä suoraan sillan hetkellisen ohjauskulman perusteella (Paavola, Lehtinen 1984, 387). Ohjausloisteho voidaan määrittää kaavan 2 mukaisesti.

$$Q_{1\alpha} = U_{di} I_d \sin \alpha \quad (2)$$

Jossa,

$Q_{1\alpha}$	on ohjauskulmasta riippuva perusaallon loisteho
$U_{di}$	on sillan tasajännitteen keskiarvo ohjauskulmalla $0^\circ$
$I_d$	on sillan tasoitettu tasavirta
$\alpha$	on sillan ohjauskulma

Tyristorisuuntaajan verkosta ottama virta poikkeaa suuresti sinimuotoisesta, joten virran yliaaltosisältö ja virtasärö ovat merkittäviä. Myös nämä vaikuttavat suuntaajan tehokertoimeen varsinaisen ohjausloistehon lisäksi yliaaltotehokertoimen kautta.

Suuntaajien aiheuttama yliaaltosisältö voidaan kuvata kaavan 3 mukaisesti.

$$n = p \cdot k \pm 1 \quad (3)$$

Jossa,

$n$	on yliaaltovirran järjestysluku
$p$	on suuntaajan sykkeluku (3, 6, 12, 24)
$k$	sijoitetaan arvo 0, 1, 2, 3, 4... jne.

Kolmivaiheisissa kokoaaltokytkennöissä ei kolmatta yliaaltoa esiinny, ja näissä merkittävimmät yliaallot ovatkin 5. ja 7. sekä vähemmissä määrin korkeamman järjestysluvun parittomat, kolmella jaottomat, yliaallot.

Yliaaltojen energia on käänteisesti verrannollinen järjestyslukuun ja putoaa siten nopeasti järjestysluvun kasvaessa. Normaaleissa käyttötilanteissa juuri matalan järjestysluvun omaavat yliaallot ovatkin kaikista ongelmallisimpia. Taulukossa 3 on esitettyä 6-pulssisen sillan virtayliaaltojen suhteellinen jakauma. (Paavola, Lehtinen, 1984, 386.)

TAULUKKO 3. Yliaaltovirran suhteellinen jakauma 6-pulssisillan syötössä

Järjestysluku	Perusaalto	5.	7.	11.	13.	17.	19.
f (Hz)	50	250	350	550	650	850	950
A (%)	100	20	14,3	9,1	7,7	5,9	5,3

Kuten taulukosta 3 käy ilmi, 5. ja 7. yliaalto ovat kaikista ongelmallisimmat 6-pulssikäytöissä, sillä niiden suhteellinen osuus perusaaltoon verrattuna on suuri. Esimerkiksi vain 10 ampeerin perusaallon virta aiheuttaa 2 ampeerin 250 Hz ja 1,4 ampeerin 350 Hz yliaaltokomponentit, jotka aiheuttavat verkon komponenteille ylimääräisiä rasituksia.

Suuntaajan verkkoon syöttämää yliaaltosisältöä voidaan vähentää käyttämällä sopivasti viritettyjä imusuotimia, jotka estävät yliaaltovirran pääsyn syöttävään verkkoon. 5. yliaallon suodin viritettäisiin siten 250 Hz taajuudelle, 7. 350 Hz taajuudelle ja niin edelleen. Suodatuksen käyttö parantaa myös suuntaajan tehokerrointa yliaaltotehokertoimen osalta, joskin varsinainen ohjauskulman aiheuttama ohjausloisteho on tässä suhteessa tärkeämmässä asemassa.

Tarvittaessa erittäin suuritehoisia käyttöjä voidaan verkolle aiheutuvia yliaaltorasituksia vähentää kasvattamalla suuntaajan pulssilukua. Tämä ei kuitenkaan ole taloudellista tässä työssä käsiteltyjen laitteistojen kokoluokassa, joten näitä ratkaisuja ei käsitellä tässä yhteydessä tarkemmin.

### 3.5 Tyristoriteknologia tänään

Johdanto tyristoritekniikkaan ei olisi täydellinen, ellei samalla mainittaisi, että nykypäivän kehittyneemmät puolijohteet ovat syrjäyttäneet tyristorikäytöt pieni-tehoisissa sovelluksissa lähes täysin. Etenkin moottorikäytöissä on siirrytty – muutamia erikoistapauksia lukuun ottamatta – pois DC-koneista. Nykyisin säädetyissä moottorikäytöissä suositaan oikosulkukoneita, joita ohjataan taajuusmuuttajilla. Modernien tehoasteiden mahdollistamat edistykselliset ohjaustavat ratkaisevat monia yksinkertaisten tyristorikäyttöjen ongelmia, kuten ohjausloistehon ja virtasärön aiheuttamia verkkovaikutuksia.

Samalla on kuitenkin todettava, että suuremmissa teholuokissa tyristorikäytöt ovat yhä säilyttäneet asemansa suuren jännite- ja virtakestoisuutensa ja yleisen luotettavuutensa takia. Käyttöjännitteiden kohotessa yli muutaman kilovoltin ja vaadittavien tehojen ollessa joidenkin megawattien luokkaa, on tyristorikäyttö edelleen taloudellinen ja teknisesti järkevä ratkaisu – joskus ainoa ratkaisu – tehonohjaukseen, erityisesti käytettäessä 12 tai 24-pulssisia topologioita. Hyvä nä esimerkkinä voidaan mainita, että tämän tyyppinen tekniikka on laajasti käytössä muun muassa HVDC-merikaapeliin liittymäpisteissä, joissa puhutaan helposti satojen megavolttiampeereiden tehoista. Näiden lisäksi yksinkertaiset tyristoritasasuuntaajat ovat edelleen varsin tavanomaisia monimutkaisempien käyttöjen etuasteissa.



## 4 ALUSTAVA SUUNNITTELU

Työtä lähdettiin toteuttamaan seuraavien suunnittelunäkökohtien mukaisesti:

1. Laitteen tulisi toimia 400 V kolmivaiheverkossa
2. Laitteen tulisi kestää vähintään 5 kVA jatkuva kuormitus
3. Laitteessa tulisi olla säädettävä ylivirtakatkaisu
4. Laitteen tulisi kestää opetuskäytön aiheuttamat rasitteet

Jotta suunnittelua voidaan lähteä toteuttamaan, tulee ensimmäiseksi valita järjestelmän kriittisimmät komponentit, joiden ympärille muu laitteisto suunnitellaan. Tärkein kokonaisuus on luonnollisesti ohjattava tehoaste, joka määrittää hyvin pitkälle ohjausjärjestelmälle asetetut vaatimukset aikaisemmin käsiteltyjen kohtien mukaan. Käyttöturvallisuuden ja luotettavan toiminnan kannalta on tärkeää perehtyä myös ohjauspulssien eristykseen. Itse ohjauslogiikka voitiin vielä tässä vaiheessa jättää topologiaaltaan ja toteutukseltaan avoimeksi. Seuraavissa kohdissa käydään läpi tehoasteen mitoitus ja hila-ajon ratkaisut.

### 4.1 Tehoaste

Edellä mainittuja näkökohtia silmälläpitäen päätettiin valita selvästi ylimitoitettut tyristorimoduulit tehoasteeseen. Tämä on järkevää jo siksi, että tyristorit ovat edullisia tarjoamaansa virrankestoon nähden. Koska haluttiin toteuttaa 6-pulssisilta, oli loogista valita tyristorimoduulit joihin on integroitu kaksi tyristoria, jotka muodostavat aina yhden positiivisen ja negatiivisen haaran. Täten kolmesta moduulista voitaisiin koota yksi 6-pulssisilta.

Täten päädyttiin Semikronin valmistamiin SKKT57/16E moduuleihin, joiden estojännitekestoisuus on 1600 V ja jatkuva virrankesto 57 ampeeria (liitoslämpötilan ollessa 125 °C). Suuri estojänniteluokka tarkoittaa sitä, että silta tulee kestämään hyvin sähköverkossa mahdollisesti esiintyviä transienttijännitteitä. Rajusti ylimitoitettu virrankestoisuus puolestaan heijastuu suurena turvamarginaalina vikatilanteissa, kuten DC-kiskoon kohdistuvien oikosulkujen yhteydessä.

Mittauksissa todettiin laboratoriossa käytössä olevien virtavaunujen prospektiivisen vikavirran olevan maksimissaan noin 400 A, joka on huomattavasti vähemmän kuin valitun moduulin terminen 1250 A kesto. Tyristorimoduulin valinnassa lähdettiin siitä, että opetuskäyttöön tarkoitetun laitteen tulee kyetä selviämään mahdollisista käyttäjän virheistä.

Valitut tyristorit on koteloitu Semipack 1-moduuleihin, jonka etuja on muun muassa sähköisesti eristetty jäähdytyslementti, joka helpottaa jäähdytyksen toteuttamista. Moduuleissa on käytetty kolmiterminaalista ratkaisua, mikä puolestaan helpottaa sillan rakentamista ja mekaanista toteutusta. Tämän kaltaiset pitkälle integroiduista moduuleista koottavat ratkaisut ovat yhä enenemissä määrin yleistymässä keskisuuren tehon sovelluksissa. Erilliskomponenteista kasatut siltaratkaisut alkavat käydä harvinaiseksi aivan suuritehoisimpia sovelluksia lukuun ottamatta. Valitun tyristorimoduulin datalehti on liitteessä 1.

## **4.2 Pulssimuuntajien mitoitus**

Pulssimuuntaja on laitteiston luotettavan toiminnan ja käyttöturvallisuuden kannalta kenties kriittisin komponentti, joten on järkevää avata sen toimintaa ja mitoitusta.

Pulssimuuntaja erottaa ohjauspiirin korkeajännitteisestä tehoasteesta. Siten on erittäin tärkeää, että sen transienttikestoisuus on käyttökohteeseen nähden riittävä. Mahdollisten transienttijännitteiden vuoksi muuntajan eristyksen tulee olla huomattavasti nimellistä käyttöjännitettä suurempi, yleensä useita kilovoltteja.

Pulssimuuntaja toimii samalla periaatteella kuin mikä tahansa muukin muuntaja; Siinä on vähintään kaksi käämistä ja sydän, jota pitkin käämien välinen magneettinen kytkentä toteutetaan. Sydänmateriaali poikkeaa tavallisista verkkotajuuksista muuntajista siinä, että se ei yleensä ole laminoitua rautaa, vaan ferriittimateriaalia. Erona tavallisiin muuntajiin on myös se, että pulssimuuntajia ajetaan tyristoriohjauskäytöissä yleensä unipolaarisesti, ts. ajojännite vaikuttaa vain yhteen suuntaan käämissä. Tämä on mahdollista koska hilapulssit ovat

jaksonaikaansa nähden hyvin lyhyitä, mistä seuraa pieni aika-jännitepinta-ala. Siten muuntajan sydän ehtii demagnetoitua pulssien välillä.

Kaupallisille pulssimuuntajille on saatavilla valmistajan ilmoittava aika-jännitepinta-alasuhte, yleensä ilmoitettuna mikrovoltisekunteina. Aika-jännitepinta-ala kuvaa pulssin amplitudin ja keston tuloa. Satunnaisesti valitulle muuntajalle tämä suhde voi olla esimerkiksi 100  $\mu\text{Vs}$ , joka tarkoittaa sitä, että muuntajan ensiököämiä ajava pulssi voi olla 100 V:n jännitteellä leveydeltään yksi mikrosekunti, tai 10 V:n jännitteellä kymmenen mikrosekuntia. Jos tämä aika-jännitepinta-ala ylitetään, muuntajan sydän alkaa kyllästyä ja toisiosta saatava pulssi vääristyy. Käytännössä kanttimuotoisella signaalilla tämä tarkoittaa sitä, että signaalin huippu alkaa taipua alaspäin pulssin loppua kohden. Jos sallittu arvo ylitetään merkittävästi, sydän kyllästyy kokonaan ja muuntajan ensiön virtaa rajoittaa enää vain sen DC-resistanssi. Äärimmäisessä tapauksessa muuntaja tai itse hila-ajuri tuhoutuu.

Muuntajille on myös yleensä nimellistehon sijasta ilmoitettu tehollinen nimellisvirta, jota ei tule ylittää. Käämityksessä kulkeva virta aiheuttaa häviöitä käämin resistanssin takia ja esimerkiksi epoksiin koteloitu muuntaja voi ylikuumentua virran kasvaessa liian suureksi. Kuten aina, käämityksen resistiiviset häviöt kasvavat virran neliönä, joten virran kaksinkertaistuminen johtaa häviötehon ja siten lämpenemisen nelinkertaistumiseen. Ylikuumeneminen johtaa eristyksen ennenaikaiseen vanhenemiseen ja voi äärimmäisessä tapauksessa aiheuttaa ensiön ja toision välisen eristyksen rikkoutumisen.

Mitoitettaessa pulssimuuntajaa kutakin käyttökohdetta varten tulee ottaa edellä mainitut näkökohdat huomioon seuraavasti:

1. Muuntajan eristyksen jännitekestoisuuden tulee olla riittävä käyttökohteeseen
2. Muuntaja ei saa normaalin toiminnan aikana olla kyllästystilassa
3. Käämityksien virta ei saa ylittää valmistajan ilmoittamaa maksimia (käyttökohteen lämpötilassa)

Tarvittaessa suurempaa hilavirtaa, tai haluttaessa vähentää ajuripiirin virtarasi-tuksia, on mahdollista käyttää pulssimuuntajaa, jonka käämitysten suhde on 2:1, tai korkeampi. Em. tapauksessa toision virta on kaksinkertainen ensiöön nähden. Tietysti toision jännite on tällöin puolet ensiöstä, mikä tulee ottaa huo-mioon; Tyristoreille on ilmoitettu tietty hilajännite, joka täytyy ylittää luotettavan liipaisun takaamiseksi. Luonnollisesti tarvittaessa suurempaa ajojännitettä voi-daan käyttää myös 1:2 suhteella olevaa muuntajaa, jolloin toision jännite on kaksinkertainen ensiöön nähden ja virta vastaavasti puolittunut. Pulssimuuntaja voidaan myös toteuttaa usealla toisiolla, esimerkiksi 1:1:1 tai 2:1:1, jolloin sa-malla muuntajalla voidaan ohjata kahta tai useampaa teholaitetta, vaikka ohjat-tavat hilat olisivat eri potentiaaleissa.

Pulssimuuntajissa tulee ottaa myös huomioon käämitysten vaiheistus. Kaupalli-sesti valmistetuissa muuntajissa tämä on yleensä ilmoitettu vähintäänkin kom-ponentin datalehdellä. Koska ohjattavat laitteet tarvitsevat (yleensä) positiivisen ohjauspulssin, on tärkeää, että muuntajan ensiön ja toision vaihepilkut osoitta-vat samaan suuntaan.

Edellä mainittujen näkökohtien perusteella päädyttiin teknis-taloudellisessa mi-toituksessa Vigortronixin valmistamiin VTX-sarjan epoksikoteloituihin muunta-jiin. Valinnan perusteena oli riittävä ajovirran kesto, hyvä 5 kV eristysraja, sekä hyvä aika-pinta-ala-suhteen arvo 340  $\mu\text{Vs}$  yhdistettynä suhteellisen edulliseen hintaan. Käytettäessä viidentoista voltin ajojännitettä voi pulssin leveys olla maksimissaan siis 20  $\mu\text{s}$ , mikä riittää hyvin valittujen tyristorien ajamiseen.

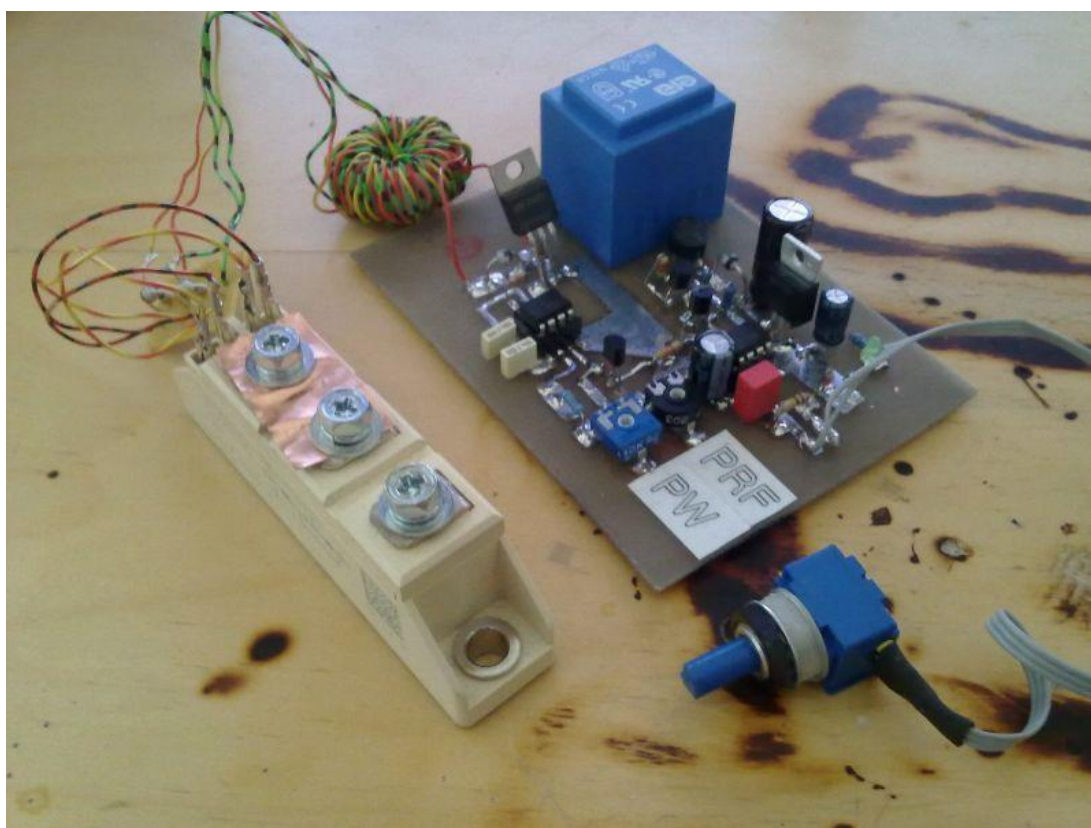
### 4.3 Kotelointi

Laitteisto päätettiin varhaisessa vaiheessa koteloida 19" räkkikoteloon. Valinta tehtiin lopullisen käyttökohteen ja huollettavuuden asettamia vaatimuksia silmäl-lä pitäen. Kuormitettavuuden parantamiseksi päädyttiin käyttämään pakotettua ilmanvaihtoa. Suunnittelussa pyrittiinkin painottamaan pitkää elinikää ja helppoa huollettavuutta tarpeen niin vaatiessa. Kun tehoasteen valinta oli selvillä ja ha-luttu kotelointiratkaisu päätetty, oli työn suuret linjat vedetty ja voitiin siirtyä pro-totyypien tuottamiseen.



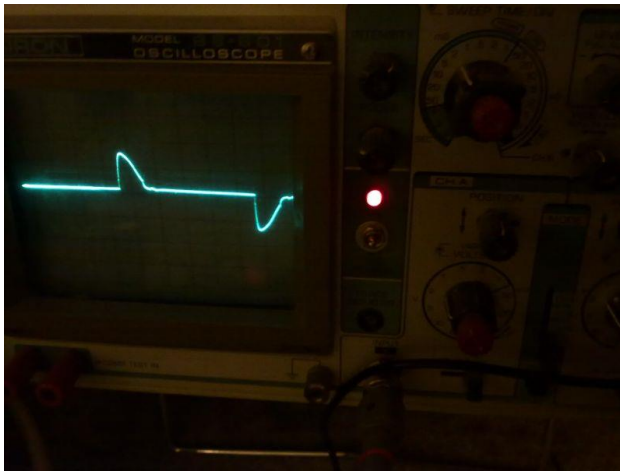
KytKentä on hyvin yksinkertainen ja yhtenä sen rajoituksista on se, että se ohjaa molempia tyristoreja yhtä aikaa. Käytännössä kytKentä toimii, mutta se ei ole optimaalinen. Puolet ohjauspulsseista johdetaan turhaan tyristorille, joka on estosuuntainen eikä siten voi syttyä johtavaksi. Teoriassa nämä ”hukkapulssit” saavat estosuuntaisen tyristorin vuotamaan enemmän virtaa, mikä voi vanhentaa teholaitteita turhaan. Tämänkaltainen yksinkertainen ohjaus ei myöskään sovellu varsinaiseen tasasuuntauskäyttöön, sillä sillan molemmat haarat saisivat ohjauksensa samanaikaisesti, josta olisi välittömänä seurauksena tuhoisa läpijohtotilanne.

KoekytKentä toteutettiin FR4-laminaatille (kuva 11). KytKentää käytettiin lähinnä hilapulssimuuntajalta vaadittavien ominaisuuksien tutkimiseen.



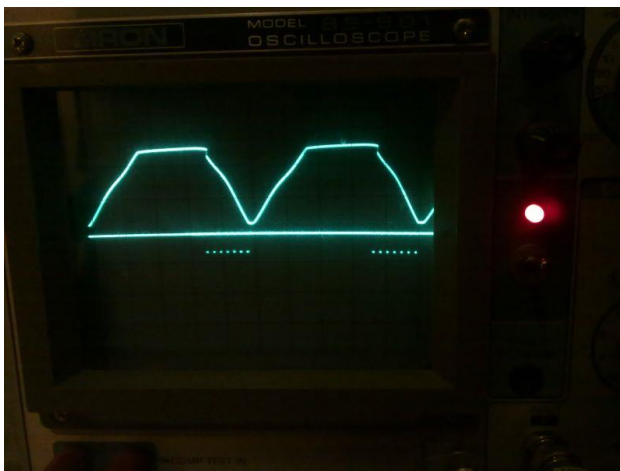
KUVA 11. Valmis kytKentä

Kuvassa 12 on esitettyä yllä rakennetun säätimen resistiiviselle kuormalle syöttämä jännite, kun ohjauskulmaa on viivästetty merkittävästi.



KUVA 12. Viivästetty vaiheohjaus. 1:10 vaimennus, 2ms/div, 2V/div Y- vahvistin

Kuvassa 13 ovat ylem্পää ohjauskulmaa vastaavat hilapulssit. Ylempi kuvaaja on verkkojännitteen nollapistetunnistuksen aaltomuoto, jonka alapuolella hilapulssit näkyvät pistemäisinä.



KUVA 13. Ohjauspulssit. 1:10 vaimennus, 2ms/div, 2V/div Y- vahvistin

Kytkenän todettiin soveltuvan käyttötarkoitukseensa ja työssä käytettävien thyristorimoduulien todellisia ajovaatimuksia saatiin selvitettyä. Näiden yksinkertaisten kokeilujen jälkeen voitiin siirtyä työn seuraavaan vaiheeseen.

## 6 TOINEN PROTOTYYPPI

Ensimmäisestä yksinkertaisesta prototyypistä saatujen kokemusten pohjalta lähdettiin suunnittelemaan hieman kehittyneempää yksivaiheista tasasuuntaajaa. Tämän prototyypin tarkoituksena oli selvittää valitun ohjauspiirin soveltuvuutta tyristorien ohjaukseen.

### 6.1 Yksivaiheisen ohjauskortin suunnittelu

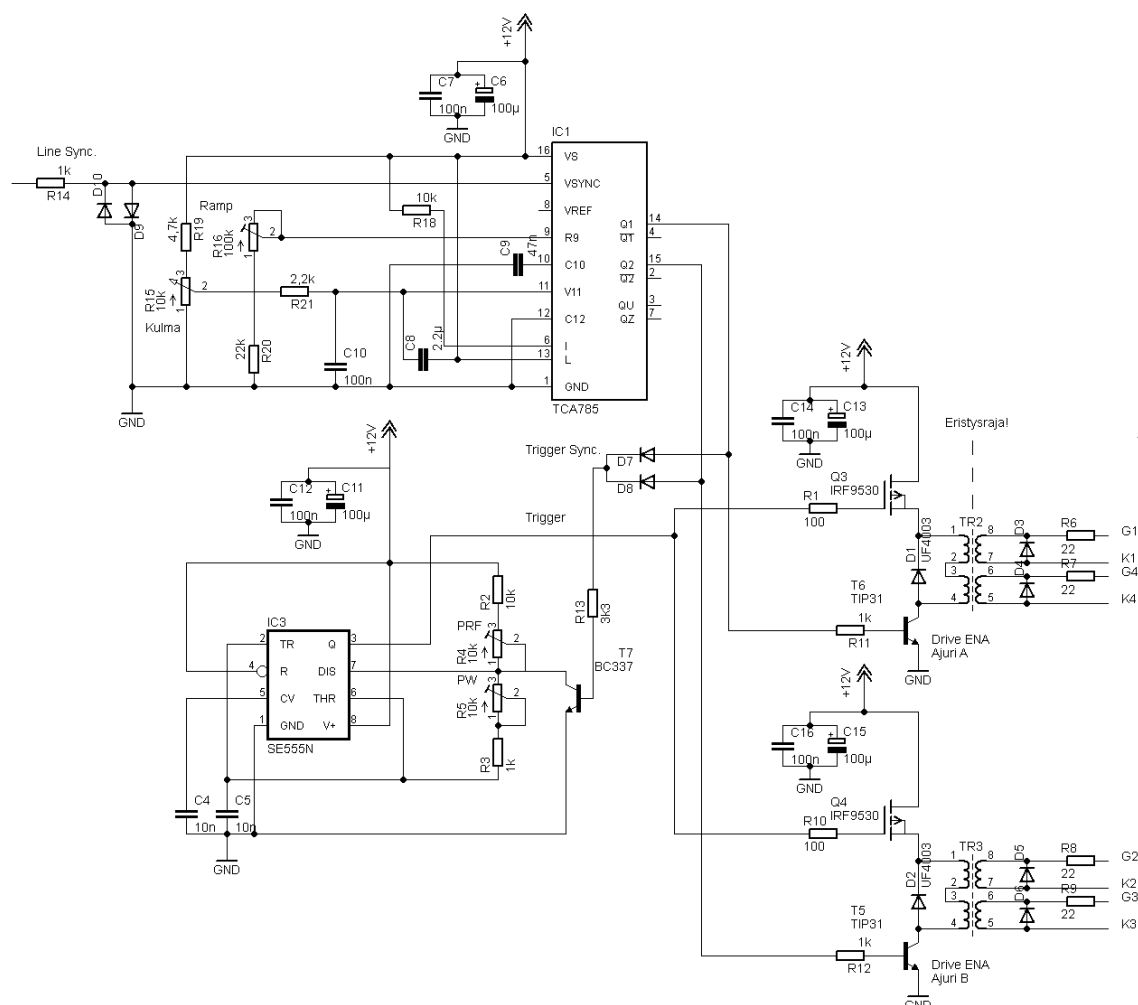
Tässä vaiheessa suunnitteluprosessia oli jo valittu sopiva ohjauspiiri vaiheohjauksen toteuttamiseen. Infineonin TCA785 (aiemmin Philips TCA785) sisältää sisäänrakennetun nollapisteilmaisimen ja ohjauskulmasäädön. Käytännössä tämä tarkoittaa helpompaa suunnittelua verrattuna erilliskomponenteista toteutettuun viivegenerointiin, mistä on etua siirryttäessä monimutkaisempiin kytkentöihin. Lisäksi se sisältää valmiiksi pulssiohjatut lähdöt, joiden avulla ohjauspulssit voidaan ohjata vain johtovuorossa olevalle laitteelle.

Koska kyseessä on yksivaiheinen kytkentä, on kummankin ohjauslähdön välillä (Q1, Q2) aina jonkinlainen kuollut aika, vähimmillään noin 1 ms tai 18 verkkoasetta. Tämä on käytetty hyödyksi siten, että hilapulssigeneraattori tahdistuu tähän kuolleeseen aikaan. Näin varmistetaan se, että seuraavaksi johtovuoroon tuleva tyristoripari saa aina täysimittaisen ensimmäisen hilapulssin. Jos pulssigeneraattori olisi vapaastikäyvä, ts. epäsynkroninen pulssinohjaukseen nähden, voisi ensimmäinen pulssi jäädä vajaaksi. Vajaa hilapulssi voisi puolestaan aiheuttaa tyristorin osittaisen syttymisen, mikä vanhentaa teholaitteita ennenaikaisesti.

Toteutettiin prototyypin kytkentä, joka nähdään kuvassa 14. Kytkentä koostuu kolmesta osasta: vaihekulmasäädin, kampa-aaltogeneraattori ja hila-ajurit. Tärkeimpänä on tietysti itse vaiheohjauspiiri, joka hoitaa verkkojännitteen nollapistetunnistuksen ja sytytysviiveen. Kaaviossa ohjauspiirin alla on ensimmäisestä koekytkennästä kierrätetty 555-ajastinkytkentä, joka luo tarvittavan 4 kHz:n

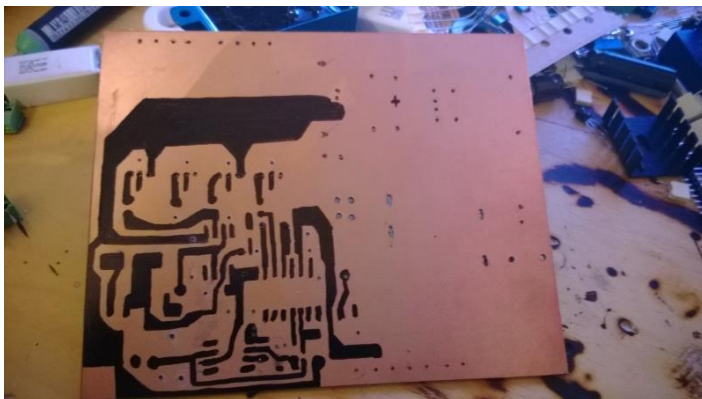


kampa-aallon. Viimeisenä ohjausketjussa ovat luonnollisesti hila-ajurit, jotka vahvistavat ohjaussignaalit ja syöttävät ne edelleen pulssimuuntajille.



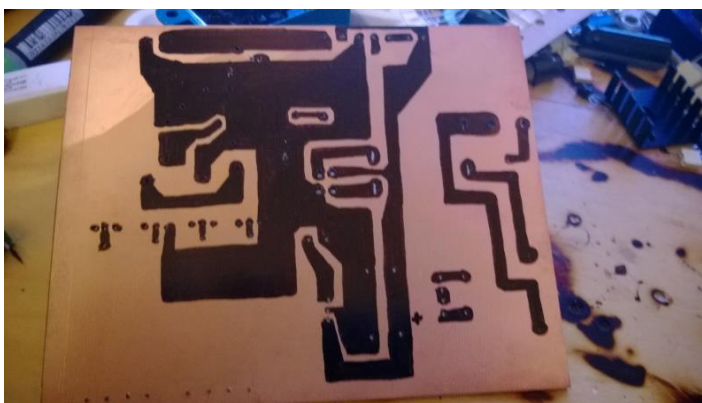
### KUVA 14. Yksivaiheinen ohjauskytkentä

Prototyyppi toteutettiin nopeasti FR4-laminaatille siten, että komponenttisijoittelu suunniteltiin ruutupaperille jonka mukaan porattiin piirilevyn reiät. Tämän jälkeen etsausmaski piirrettiin suoraan levyn pintaan tussilla. Tämä on yksinkertainen ja nopea tapa tuottaa prototyyppejä, joskaan se ei luonnollisesti sovellu massatuotantoon millään tavalla. Näin voidaan hyödyntää sekä läpiladottavaa, että pintaliitostekniikkaa yksinkertaisesti varhaisessa prototyyppituotannossa. Sähköisen kytkennän suunnittelun jälkeen itse prototyyppi syntyi päivässä. Kuvat 15 ja 16 esittävät piirikortin valmistusprosessia.



KUVA 15. Ohjauskortin yläpuolen etsausmaski

Kuten kuvasta 15 käy ilmi, kortin ylempi kerros käytettiin pääasiassa signaali-kerroksena. Kuvasta 16 nähdään kortin alapuolen maski, joka sisältää kytkennän maakerroksen ja virtalähteen johdinvedot.



KUVA 16. Ohjauskortin alapuolen etsausmaski

## 6.2 Pulssimuuntajien rakentaminen

Koska pulssimuuntajat ovat laitteiston kriittisimmät komponentit luotettavan toiminnan ja käyttöturvallisuuden kannalta, on järkevää käydä läpi niiden mitoitus omana osanaan.

Koska käytössä on yksinkertainen yksivaiheinen siltakytkentä, voidaan teholaitteiden ohjausta yksinkertaistaa käyttämällä vain kahta pulssimuuntajaa. Tätä varten vaaditaan pulssimuuntajat, joissa on kaksi toisiota. Tällöin muuntajien

ensiöihin toteutetaan pulssinohjaus ja muuntajien toisiot ajavat suoraan kunkin haaran teholaitteita. Toisiot on tällöin kytkettävä siten, että niiden välillä on  $180^\circ$  vaihesiirto. Tämä onnistuu käytännössä vaihtamalla toisen käämityksin johtojen päät keskenään.

Työn tässä vaiheessa ei pulssimuuntajien lopullista valintaa vielä oltu tehty, joten muuntajat päädyttiin käämimään itse prototyyppiä varten. Muuntajat käämittiin Ferroxcube 3E25 -materiaalisille toroidaalisille ferriittisydämille suhteella 2:1:1. Käämikierroksia on ensiössä yhteensä 20, toisioissa 10. Täten 15 V ajojännitteellä tulee hilapulssin amplitudiksi noin 7,5 V. Tällä tavalla pyrittiin vähentämään hila-ajopiirin virtarasitusta ja sitä kautta pienentämään häviötehoa. Tämä on edukasta siksi, että yksi ajuri ohjaa kahta tyristoria, eivätkä tyristorit tarvitse jänniteamplitudiltaan kovin voimakasta hilapulssia liipaistuakseen.

Muuntajien mitoitus tehtiin puhtaasti empiiristen kokeiden perusteella. Käämikierroksia lisättiin, kunnes oskilloskoopilla ei ollut havaittavissa sydänmateriaalin kyllästymistä halutulla jännitteellä ja käytettävällä pulssinleveysalueella. Tämän jälkeen kierroksia lisättiin vielä muutama lisää, tuomaan varmuusvaraa muuntajien toimintaan.

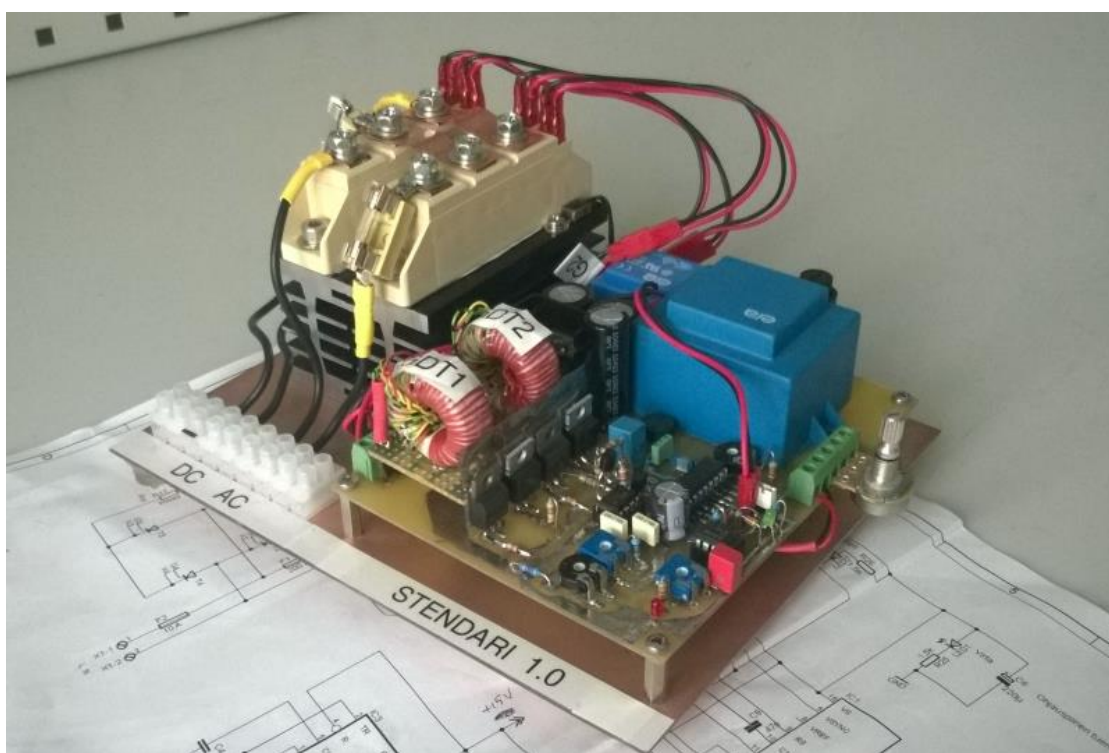
Muuntajien käämityksiin käytettiin muovieristeistä yksisäikeistä kytkentäjohtoa. Näin saatiin hieman parempi jännitekestoisuus ja luotettavuus kuin käytettäessä lakattuja käämijohtimia. Muuntajan ensiö- ja toisiokäämit eriteltiin sydämen eri puolille, jotta saatiin hieman korkeampi eristysraja, joskin tämä ratkaisu kostautuu lisääntyneen hajainduktanssin muodossa. Käytännössä tästä hajainduktanssin kasvusta ei kuitenkaan ollut haittaa – se ilmenee lähinnä pulssin hienoisena vääristymisenä, mutta tässä käytössä pieni vääristymä ei aiheuta ongelmia. Kaksinkertainen toisiokäämitys tehtiin kierretyllä parilla, jolla varmistettiin vuon tasainen jakaantuminen käämitysten kesken.

Kun muuntajien aika-jännitepinta-alan riittävyys ja muu toiminta oli varmennettu, kyllästettiin käämitykset epoksiliimalla, jolloin saatiin kasvatettua muuntajan eristysvahvuutta ja mekaanista kestävyyttä. Valmiit muuntajat koestettiin yhden kilovoltin DC -jännitteellä käyttäen Fluke 1653 -asennustesteriä. Koestus tehtiin sekä toisioiden ja ensiön, että toisioiden välillä. Vuotovirtoja tai läpilyöntejä ei

havaittu, eristysvahvuuden ollessa tällä jännitetasolla yli 1000 megaohmia. Täten muuntajien eristysvahvuus todettiin riittäväksi niiden käyttötarkoitukseen nähden.

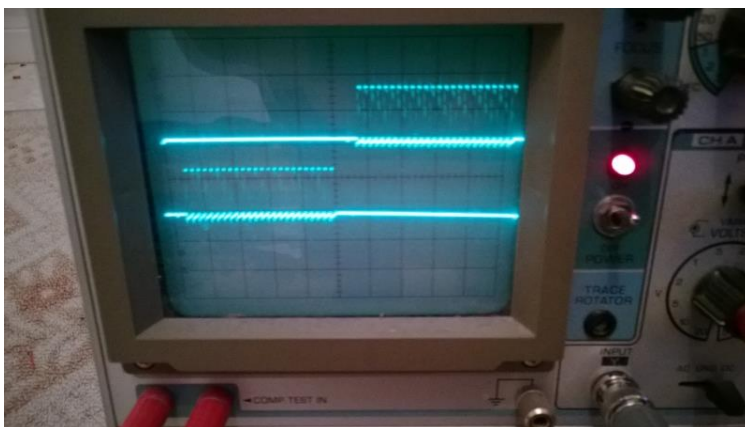
### 6.3 Prototyypin koestus

Kun pulssimuuntajien toiminta oli koestettu, voitiin prototyypilaitteisto koota ja koestaa. Valmis prototyyppi on kuvassa 17.



KUVA 17. Yksivaiheinen ohjattu tasasuuntaaja

Sytytyslogiikan toiminta koestettiin ensin siten, että tyristorisuuntaajaan ei ollut kytkettynä jännitettä. Tällä tavalla pystyttiin kytkemään oskilloskoopin mittapäät suoraan ohjattavien laitteiden hiloille ja todentamaan sytytyspulssien soveltuvuus. Kuvasta 18 käy ilmi, miten ohjauslogiikka erottelee ohjauspulssit kulloinkin johtovuorossa olevalle haaralle.



KUVA 18. Pulssinohjaus. 1:10 vaimennus, 2ms/div, 1V/div Y-vahvistin

Ylemmässä kuvassa oskilloskoopin kanavat mittaavat saman haaran tyristorien hilajännitettä ohjauskulman ollessa  $\sim 20^\circ$ . Kuvasta käy ilmi johtovuorojen välissä oleva kuollut aika, jota käytiin läpi kohdassa 6.1.

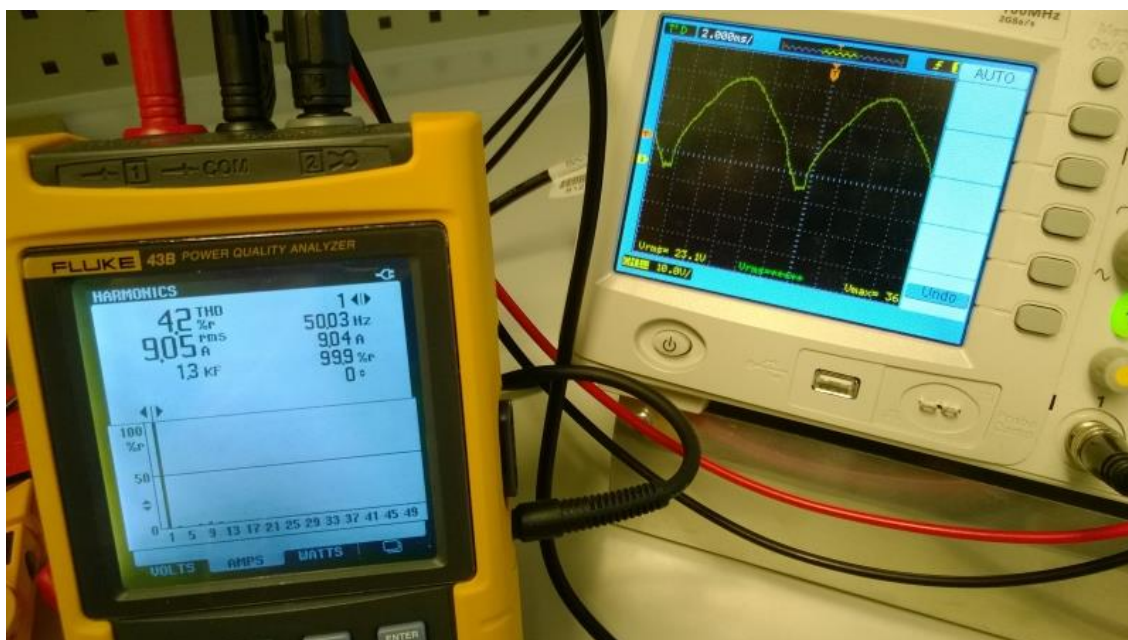
Kun prototyypin toiminta oli todennettu kotiloissa, tuotiin laite TAMK:in sähkölaboratorion tiloihin syvällisempää koestusta varten (Kuva 19).



KUVA 19. Koekytettä

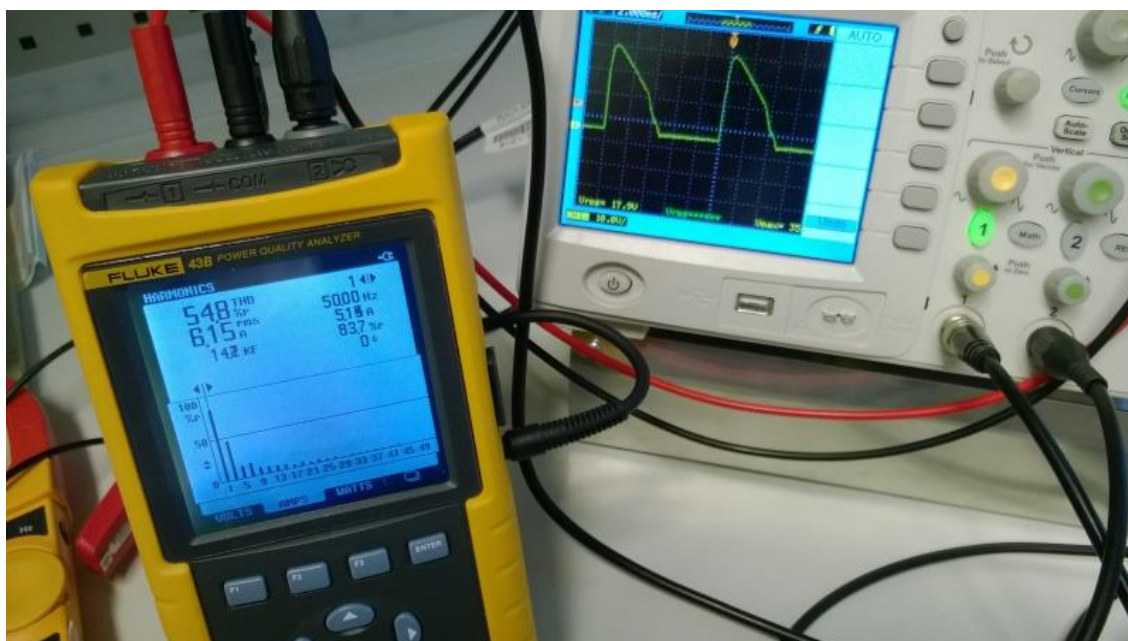


Koekyt kennässä käytettiin resistiivistä kuormitusta. Kuvassa 20 on esitettyä sillan lähtöjännite resistiivisellä kuormalla ohjauskulman ollessa noin 20°.



KUVA 20. Pieni ohjauskulma. 1:200 vaimennus, differentiaalinen, 2ms/div, 10V/div Y-vahvistin

Kuvasta 20 nähdään, että tasasuuntaajan toiminta pienellä ohjauskulmalla vastaa hyvin pitkälle normaalin dioditasasuuntaajan toimintaa. Kuvasta nähdään myös, että virran THD, eli särö, on suhteellisen vähäinen (4,2%) ohjauskulman ollessa pieni, eikä virta sisällä merkittävästi yliaaltoja. Tämä on odotettavissa, sillä puhtaan – suodattamattoman – tasasuuntauksen tehokerroin on yleisesti ottaen hyvä. Tilanne kuitenkin muuttuu nopeasti kun ohjauskulmaa viivästytetään, kuten kuvasta 21 käy ilmi.



KUVA 21. Sillan lähtöjännite ohjauskulmalla  $90^\circ$ . 1:200 vaimennus, differentiaalinen, 2ms/div, 10V/div Y-vahvistin

Kuvasta nähdään selvästi, kuinka DC-jännitteen aaltomuoto on muuttunut edelliseen käyttötilanteeseen verrattuna. Ohjauksen viivästyksen takia aaltomuoto ei enää seuraa verkkojännitteen sinimuotoa, vaan nousee äkisti verkkojännitteen huippuarvoon. Samalla nähdään myös suuntaajan aiheuttamat verkkovaikutukset. Koska suuntaajan ottama virta ei ole enää lähelläkään sinimuotoista, on myös virran THD suuri (54,8%). Samaten nähdään, että virta sisältää suuren määrän yliaaltokomponentteja, näistä tärkeimpänä 3. yliaalto (150 Hz), joka on lähes puolet perusaallon suuruudesta.

Kokeissa todettiin 1-vaiheisen prototyypin toimivan odotetulla tavalla. Tämän pohjalta pystyttiin aloittamaan varsinaisen kolmivaiheisen laitteiston suunnittelua, mikä käydään läpi luvussa 7.

## 7 KOLMIVAIHEINEN PROTOTYYPPI

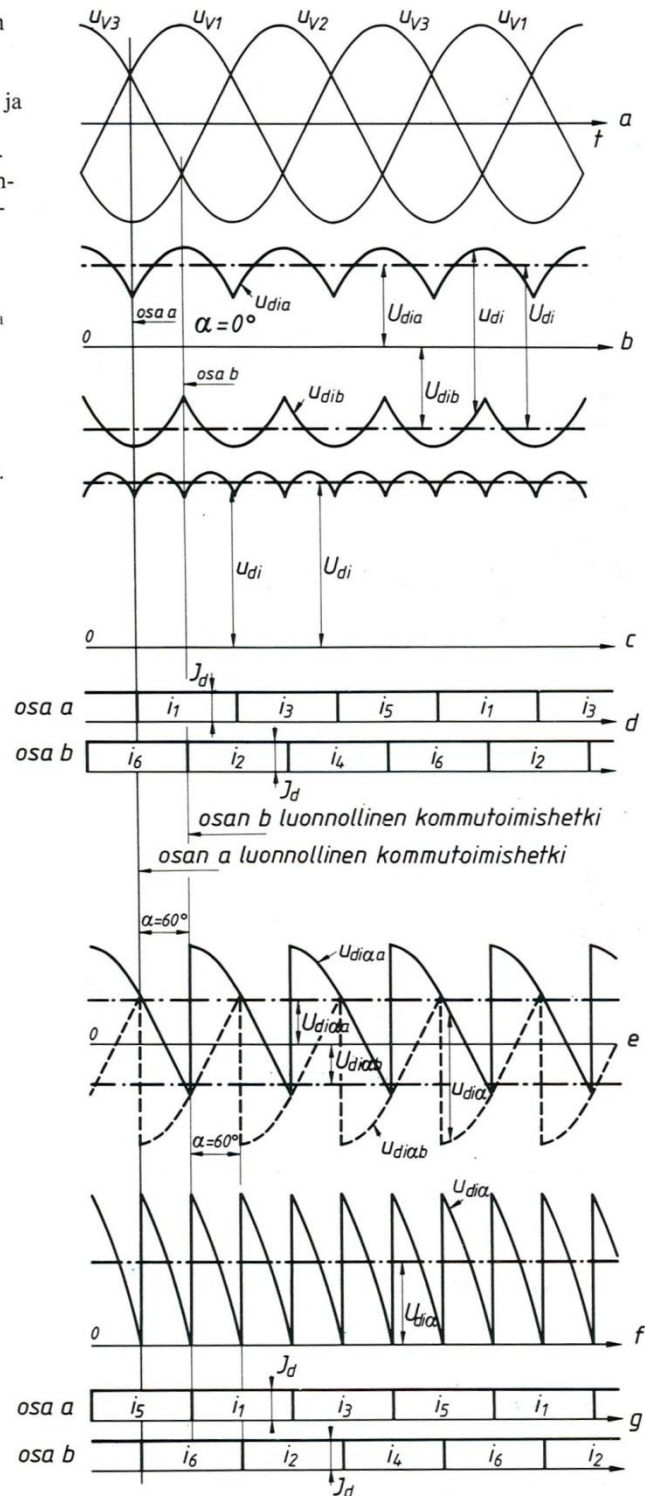
Aiemmista prototyypeistä saadun kokemuksen pohjalta voitiin lähteä suunnittelemaan kolmivaiheista sytytysyksikköä. Kolmivaiheisesta järjestelmästä tehtiin vielä yksi prototyyppi, jonka avulla pystyttiin tutkimaan tämän tyyppiseltä laitteistolta vaadittuja ominaisuuksia. Samalla pystyttiin arvioimaan kehitettyjen ratkaisujen suorituskykyä ja toiminnallisuutta ennen varsinaisen lopullisen version tuotantoa.

### 7.1 Tahdistusmuuntajat

Ensimmäinen asia joka tulee ottaa huomioon siirryttäessä yksivaiheisesta järjestelmästä kolmivaiheiseen, on se, että teholaitteiden ohjaus ei toteudu enää samoilla ehdoilla. Siinä missä yksivaiheisen tyristorisuuntaajan teoreettiset kommutointihetket ovat  $0^\circ$  ja  $180^\circ$ , ovat vastaavat hetket kolmivaiheisessa sillassa siirtyneet  $30^\circ$  eteenpäin, kuten luvun 3.3 taulukossa 2 on esitetty. Täten kolmivaiheisessa sillassa luonnollinen kommutointihetki on  $30^\circ$  varsinaisen vaihejännitteen nollakohdan jälkeen. Tämä käy ilmi myös kuvasta 22.



- Kuva 52.12. Kolmivaihesillan jännitteet ja virrat.
- Vaihtojännite.
  - $\alpha = 0$ . Osajännitteet  $u_{dia}$  ja  $u_{dib}$  sekä  $U_{dia}$  ja  $U_{dib}$ .
  - $\alpha = 0$ . Suuntaajan tasajännitteen hetkellisarvon vaihtelu. Tasajännitteen keskiarvo.
  - $\alpha = 0$ . Venttiilien virrat.
  - $\alpha = 60^\circ$ . Osajännitteet  $u_{diaa}$  ja  $u_{diab}$  sekä  $U_{diaa}$  ja  $U_{diab}$ .
  - $\alpha = 60^\circ$ . Suuntaajan tasajännitteen hetkellisarvon vaihtelu. Tasajännitteen keskiarvo.
  - $\alpha = 60^\circ$ . Venttiilien virrat.



KUVA 22. Tyristorien kommutointihetket 6-pulssisillassa (Paavola Lehtinen, 1984, 384)

Valittu ohjauspiiri, TCA785, on tarkoitettu pääasiallisesti vaiheohjaukseen, eikä siten pysty erottelamaan nollapisteen ylityksen ja luonnollisen kommutointihetken välillä. Jos piirin ohjaukseen käytetään 6-pulssisillassa suoraa vaihejänni-

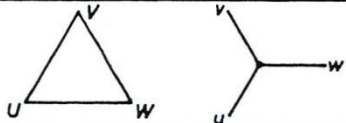
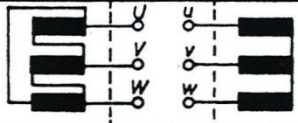
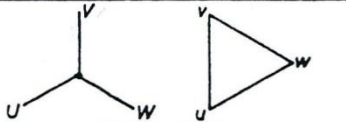
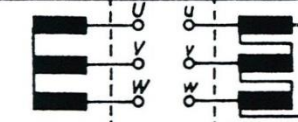
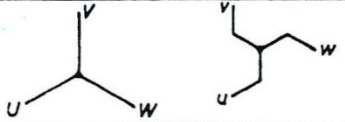
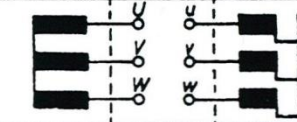
tettä, tulevat sytytyspulssit alkamaan 30° etuajassa luonnolliseen kommutointi-hetkeen verrattuna.

Ongelma voitaisiin ratkaista yksinkertaisesti käyttämällä ohjauksessa 1,66 ms lisäviivettä, joka vastaa 50 Hz verkkotaajuudella tuota 30° vaihesiirtoa. Tällöin kuitenkin hukattaisiin osa ohjauspiirin säätöalueesta, eikä ratkaisu muutenkaan olisi erityisen elegantti; kytkentä ei soveltuisi suoraan esimerkiksi 60 Hz:n tai 400 Hz:n verkkoihin.

Koska ohjauksen vaihetieto täytyy joka tapauksessa erottaa syöttävästä 400 V:n sähköverkosta jollakin tavalla, oli loogista lähteä hakemaan muuntajakytkentää, jolla voitaisiin toteuttaa tarvittava 30°:een vaihesiirto. Muuntajakytkentään vaikuttavat kuitenkin tietyt ehdot:

1. Toision tähtipiste on oltava saatavilla
2. Kytkennän ensiöpuolen on kyettävä kytkeytymään turvallisesti 400 V verkkoon
3. Toisiojännitteen osoittimen on oltava 30° jäljessä ensiöjännitettä

Sopivaa muuntajakytkentää lähdettiin hakemaan näiden lähtötietojen perusteella kuvan 23 kaltaisesta taulukosta. Täydellinen taulukko eri kytkentäryhmistä on liitteessä 2.

11	$Dy11$			$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
11	$Yd11$			$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$
11	$Yz11$			$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$

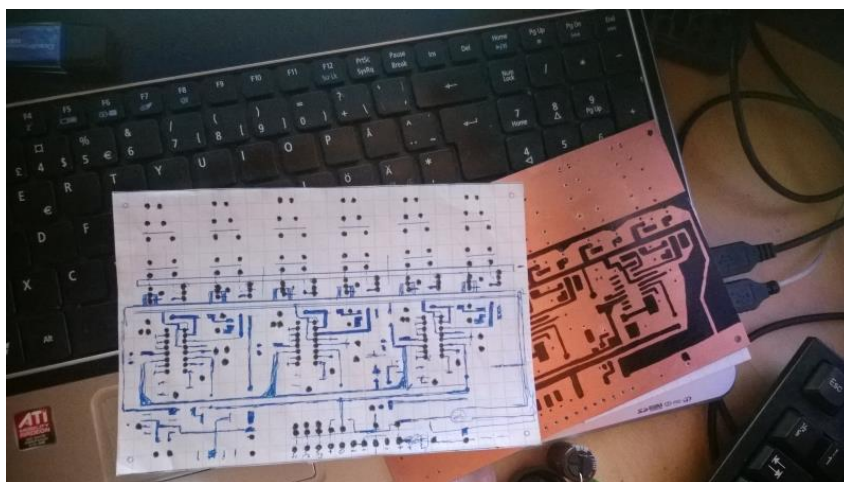
KUVA 23. Muuntajien kytkentäryhmät (Hannes Ignatius, 1981, 9)

Jotta tahdistukseen voidaan käyttää edullisia piirikorttimuuntajia, on kytkennän oltava sellainen, missä ensiökäämitykseen kohdistuu vain vaihejännite. Täten kaikki Dy- ja Dz-kytkennät voidaan heti hylätä. Jotta  $30^\circ$  vaihesiirto olisi mahdollinen, tulee käämitysten tyyppien kuitenkin olla eriäviä, joten Yy-kytkennät voidaan myös hylätä. Yd-kytkentä mahdollistaisi  $30^\circ$  vaihesiirron, mutta tällöin toisio nollapiste ei ole saatavilla. Täten ainoaksi vaihtoehdoksi jää Yz-kytkentä, joka on sähköisesti tähti-tähti kytkentä, mutta jänniteosoittimiltaan vastaa tähti-kolmio -kytkentää. Koska tarvitaan  $30^\circ$  negatiivinen vaihesiirto, tulee kytkentäryhmäksi tällöin Yz11.

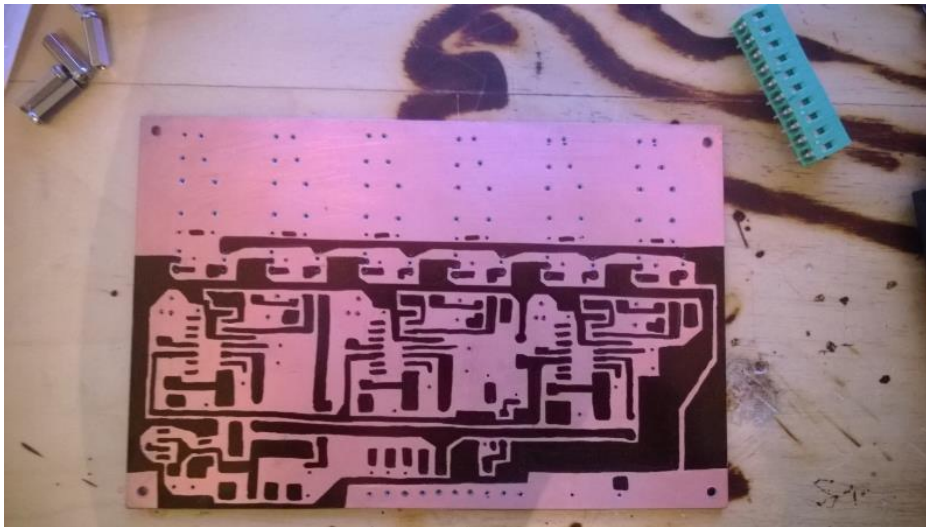
Kun tarvittava vaihetieto tuodaan ohjauspiireille, voidaan kolmivaiheinen ohjaus toteuttaa hyvin pitkälti samalla tavalla kuin yksivaiheisessakin ajurissa. Erotuksena on tietenkin se, että ajuripiirejä tarvitaan kolme – yksi jokaiselle vaiheelle.

## 7.2 Sytytysyksikkö ja muuntajakortti

Kun ohjausmuuntajien kytkennät oli selvitetty, voitiin siirtyä itse sytytysyksikön suunnitteluun. Koska piirikorttimuuntajat ovat suhteellisen kookkaita ja painavia, katsottiin heti järkeväksi erottaa ohjausmuuntajat ja sytytysyksikkö erillisille korteille. Itse korttien valmistus prototyyppejä varten tehtiin samalla periaatteella kuin aiemmissakin versioissa. Valmistusprosessi on esitettyinä kuvissa 24, 25 ja 26.



KUVA 25. Sytytysyksikön layout ja lopullinen kortti



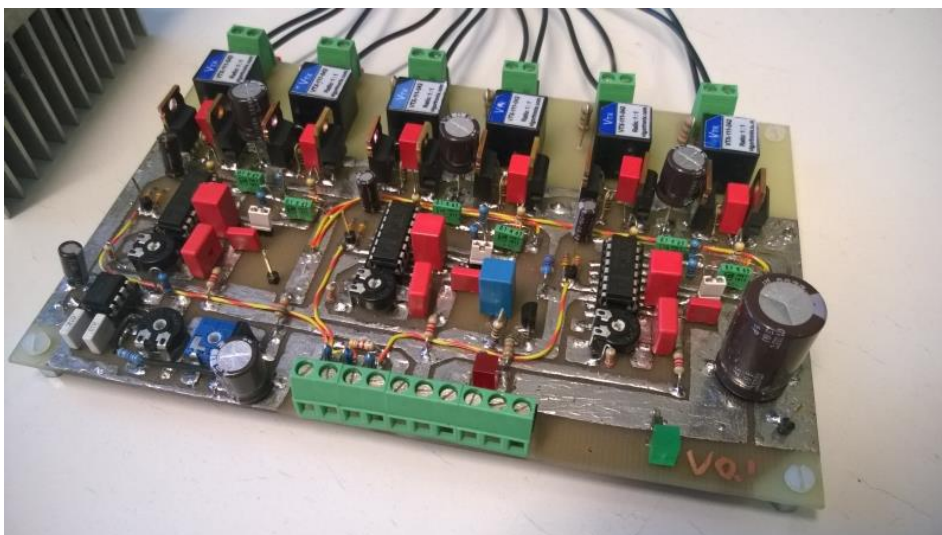
KUVA 26. Piirikortin yläkerros



KUVA 27. Piirikortin alakerros

Kuten kuvista 26 ja 27 käy ilmi, kortin yläkerros on käytetty signaalikerroksena ja alakerros on säilytetty lähes yhtenäisenä maatasona. Kuvasta 27 käy myös ilmi kortin yläreunassa olevat, pulssimuuntajien alle tulevat, erotusrajat. Erotusvälit on huomioitu niin ajoelektroniikan ja hilalähtöjen, kuin yksittäisten hilalähtöjenkin välillä. Kuvissa 28 ja 29 nähdään valmiit kortit.





KUVA 28. Valmis sytytysyksikkö

Kuvassa 28 nähdään alaosassa ohjauskortin tuloliitännät, joita pitkin tuodaan sisään tarvittavat vaihetiedot, käyttöjännite ja ohjauskulmatieto. Kortin vasemmassa alareunassa on kampa-aaltogeneraattori. Itse vaiheohjauspiirit ovat rivissä kortin keskiosassa tukikomponentteineen. Hila-ajurit pulssimuuntajineen ovat kortin yläosassa.

Luvussa 7.1 valittua muuntajakytkentää varten tehtiin myös kortti, käyttäen samaa periaatetta kuin yllä. Tämä kortti sisältää myös sytytysyksikön +15 V virtalähteen. Valmis muuntajakortti on kuvassa 29.



KUVA 29. Muuntajakortti

Kuvan 29 vasemmassa reunassa on virtalähteen 15 V syöttömuuntaja. Samassa yhteydessä nähdään vasemmalta oikealle virtalähteen tasasuuntaussilta, suotokondensaattorit ja 15 voltin TO-220 koteloinen regulaattori. +15 V käyttöjännite on liittimen vasemmassa reunassa, maaliitin sen vieressä ja kolme oikeanpuolimmaista lähtöä on tahdistussignaaleja varten.

### 7.3 Tehoaste

Tehoaste rakennettiin kohdassa 4.1 valittujen tyristorimoduulien ympärille. Prototyyppiä varten tehtiin piirikortti, joka sisältää DC-kiskon siltauspalat sekä tehoasteen tarvitseman RC-suojan. Prototyyppiä varten rakennettu tehoaste on kuvassa 30.



KUVA 30. Tehoaste

On huomionarvoista, että prototyypin tehoasteen suojaus on vielä puutteellinen. Käytettäessä tyristorisuuntaajaa vaihtosuuntauskäytössä on mahdollisuus, että silta joutuu läpijohtavaan tilaan, ts. kippaa. Tällöin sillan yksi tai useampi haara johtaa suoraan läpi DC-kiskojen välistä. Virta voi kasvaa tällöin hyvin suureksi, riippuen siitä, kuinka paljon energiaa DC-kiskon takana on. Jos energiaa on paljon, on olemassa selvä tehoasteen rikkoutumisen vaara.

Koska tyristori ei kommutoi tai siirry johtamattomaan tilaan ennen kuin virta sen ylitse ajautuu alle tietyn kynnysarvon, ei tätä mahdollista läpijohtotilannetta voida katkaista ulkoisella ohjauksella. Ainoa keino tilanteen korjaamiseksi ja tyristorin pelastamiseksi on katkaista DC-piirin virta jollain muulla keinolla. Käytännössä tämä tapahtuu asettamalla sulake jokaisen tyristorihaaran kanssa sarjaan siten, että kolmivaiheisessa sillassa on yhteensä kuusi sulaketta tyristorien ja DC-kiskon välissä. Prototyypissä kuitenkin katsottiin, että tämä suojaus voidaan jättää toteuttamatta, sillä käytetyt syötöt olivat suhteellisen korkeaimpe-  
danssisia, eivätkä siten voineet antaa kylliksi vikavirtaa tyristorien vahingoittamiseen.

### 7.3.1 RC -suojan mitoitus

RC -suojan tarkoituksena on käytännössä toimia alipäästösuotimena ja siten pehmentää suojattavan komponentin yli tapahtuvia jännitemuutoksia. Tässä tapauksessa suojan tehtävänä on suojata teholaitteita transienttijännitteitä ja tahatonta liipaistumista vastaan. Samalla RC-piiri toimii myös tietynlaisena kytkentäapupiirinä, helpottaen tyristorin syttymistä.

RC-piirien mitoitus tehtiin noudattaen ABB:n julkaisussa *Design of Snubbers for Phase Control Apps* (2001) ja annettuja ohjeita.

RC-piirin aikavakio määräytyy kaavan 4 mukaisesti.

$$\tau = RC \quad (4)$$

Jossa,

$\tau$  on piirin aikavakio

R on resistanssi ohmeissa

C on kapasitanssi faradeissa

Koska RC-piiri sisältää resistanssin, se on häviöllinen komponentti. Yksittäisen RC-suojan häviöteho määräytyy kondensaattorin varastoiman energian kautta. Kondensaattorin energia voidaan laskea yksinkertaisesti kaavan 5 avulla.

$$E = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (5)$$

Jossa,

E on kondensaattorin energia

C on kondensaattorin kapasitanssi

U on kondensaattorin jännite.

Kondensaattorin jännite voidaan ilmaista kommutointijännitteenä, joka voidaan esittää kaavan 6 avulla.

$$V_c = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\alpha \quad (6)$$

Jossa,

$V_c$  on kommutointijännite

U on syöttävän verkon pääjännite

$\alpha$  on sillan ohjauskulma

Täten kondensaattorin yli muodostuva jännite on riippuvainen ohjauskulmasta ja sen energia voidaan ratkaista kaavan 7 mukaisesti.

$$E = \frac{1}{2} C \cdot (\sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\alpha)^2 \quad (7)$$

Jossa,

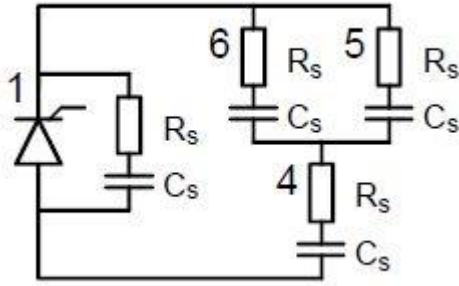
U on syöttävän verkon pääjännite

$\alpha$  on sillan ohjauskulma

Voidaan todeta kondensaattorin energian olevan maksimissaan ohjauskulman ollessa  $90^\circ$  ja minimissään kulmilla  $0$  ja  $180^\circ$ .

Mitoituksessa on kuitenkin otettava huomioon käytettävän sillan topologia. Koska kuusipulssisillan RC-suojat vaikuttavat toistensa toimintaan, on lisäksi otettava huomioon tutkittavan laitteen viereisten tyristorien toiminta eri ohjaustilanteissa. Kuva 31. esittää yksittäisen RC-suojan ekvivalenttipiiriä tutkittavan tyristorin sammutushetkellä.





KUVA 31. RC -suojan ekvivalenttikytkentä sammutushetkellä (ABB, 2001)

Yksittäisen tyristorin näkemä RC-suojan kapasitanssi ja resistanssi voidaan määrittää kaavojen 8 ja 9 mukaisesti.

$$R_{eq} = \frac{3}{5} R_s \quad (8)$$

Jossa,

$R_{eq}$  on kytkennän ekvivalentti resistanssi

$R_s$  on yksittäisen RC-kytkennän resistanssi

Vastaavasti kapasitanssi voidaan määrittää kaavalla

$$C_{eq} = \frac{5}{3} C_s \quad (9)$$

Jossa,

$C_{eq}$  on kytkennän ekvivalentti kapasitanssi

$C_s$  on yksittäisen RC-kytkennän kapasitanssi

Häviöenergian kannalta vain kondensaattorin arvolla on merkitystä, resistanssin määrittäessä kytkennän aikavakion. Yksittäisen RC-suojan, *yksittäisen kommutoinnin*, häviöenergia voidaan laskea siten yksinkertaistetusti kaavan 10 mukaisesti:

$$E_{on} = \frac{C}{2} V_c^2 \quad (10)$$

Jossa,

$E_{on}$  on kondensaattorin energia tyristorin kommutointihetkellä

$V_c$  on kondensaattorin jännite kommutointihetkellä

Kondensaattori tyhjenee täysin sarjavastuksensa kautta tyristorin liipaistuessa johtavaksi. Vastaavasti, se latautuu tyristorin sammuaessa ylemmän kaavan mukaisesti. Täten jokaista verkkojaksoa kohden tapahtuu yksi latautuminen ja yksi purkautuminen, joiden häviöenergiat ovat verrattavissa toisiinsa.

Myös vierekkäisten tyristorien kommutointi vaikuttaa tutkittavan RC-piirin häviöihin, sillä vierekkäiset suojat ovat kuvan 31 mukaisessa kytkennässä. Täten yksittäisen puolijakson häviöenergian laskemiseksi täytyy ottaa myös muiden tyristorien kommutointi huomioon. Tämä on tehty kaavassa 11.

$$E_{cycle} = 2 \cdot C_{eq} \cdot V_c^2 \quad (11)$$

Jossa,

$E_{cycle}$  on yhden verkkojakson häviöenergia yhdessä RC-suojassa.

$V_c$  on kondensaattorin jännite kommutointihetkellä

Häviöenergia pystytään muuntamaan häviötehoksi yksinkertaisesti kertomalla yksittäisen verkkojakson häviöenergia verkkotaajuudella ( $W = J/s$ ).

RC-suojassa on järkevää käyttää mahdollisimman pientä kapasitanssia, jotta häviöenergia pysyy aisoissa. Täten valittiin 100 nF kondensaattorit. Kondensaattorivalinnan perusteella voidaan ratkaista suurin vaadittava häviöteho, joka saavutetaan ohjauskulman ollessa  $90^\circ$ . Täten:

$$V_c = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\alpha = \sqrt{2} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sin 90 = 565,6 \text{ V}$$

Josta seuraa jaksottainen häviöenergia:

$$E_{cycle} = 2 \cdot \frac{5}{3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot 566 \text{ V}^2 = 0,1067 \text{ J}$$

Jonka perusteella voidaan ratkaista häviöteho:

$$P_h = 0,1067 \text{ J} \cdot 50 \frac{1}{\text{s}} \approx 5,3 \text{ W}$$

Todetaan, että RC-suojan vastusten on kestävä vähintään tämä 5,3 W häviöteho – tosin saatu tulos on järkevää vielä pyöristää ylös siten, että mitoitus-teho on 6 wattia. Suositus on, että tehovastuksia ajetaan maksimissaan noin 60 % teholla niiden nimellistehoon verrattuna, jolloin vastuksien pintalämpötila ja sitä kautta vanheneminen pysyvät aisoissa. Samalla myös vastuksia ympäröivät komponentit, tässä tapauksessa kondensaattorit, eivät kärsi ylimääräisestä lämpenemisestä. Itse kondensaattoreissa tapahtuu myös häviöitä, mutta matalan kytkentätaajuuden seurauksena ne ovat niin vähäisiä, että ne voidaan jättää käytännön mitoituksessa kokonaan huomioimatta.

Suojan mitoituksessa on myös otettava huomioon komponenttien jännitteenkestoisuus, jonka on myös oltava vähintään aikaisemmin laskettu 565 voltia. Tämä jännite kohdistuu niin vastuksiin kuin kondensaattoreihinkin ja se niiden on kestävä. Mahdollisten transienttijännitteiden vuoksi on järkevää valita komponentit, joiden jänniteluokka on huomattavasti korkeampi kuin laskettu. Ylemmän mitoituksen perusteella RC-suojan vastuksien tehonkestoksi riittäisi 6 W, mutta jännitekestoisuuden, yllä mainitun 60 % tehorajoituksen ja komponenttien saatavuuden vuoksi päädyttiin valitsemaan fyysisesti huomattavasti suuremmat 13 W:n tehovastukset.

Koska jokainen RC-piiri tuottaa maksimissaan noin 6 W:n häviötehon, on suoji-en yhteenlaskettu häviöteho noin 36 wattia. Tästä hukkalämmöstä on päästävä eroon, ja se on siten otettava huomioon laitteiston jäähdytystä suunniteltaessa.

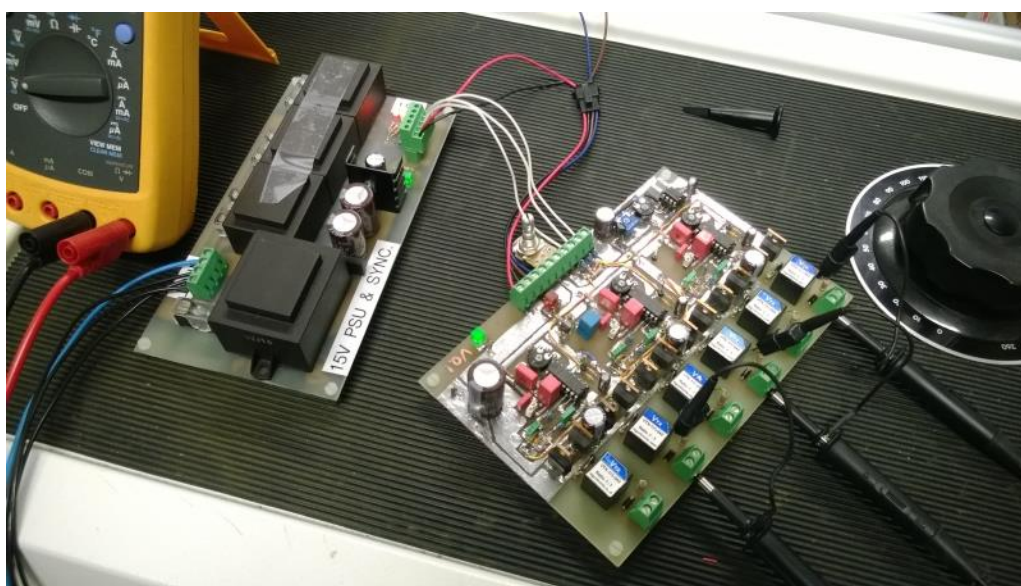
Kondensaattori on suoritusarvoiltaan kytkennän kriittisin komponentti. Sopivia tyyppisiä ovat folioon tai, pienemmissä teholuokissa metalloituun filmiin perustuvat polypropeenikondensaattorit. Polypropeenieristeiset kondensaattorit tarjoavat yleisesti vähäisimmät häviöt tämän tyyppin sovelluksissa.

Kondensaattorin valinnassa päädyttiin WIMA:n valmistamiin 100 nF MKP10 -sarjaan, joka perustuu metalloituun filmiin. Saman valmistajan FKP-1 sarja soveltuisi hyvin suurempaa tehoa vaativiin sovelluksiin, sillä se perustuu folioon ja sen virrankestoisuus on siten parempi.

Yhdessä 48 ohmin vastuksien kanssa 100 nanofaradin kondensaattoreilla saadaan kytkennän aikavakioksi 4,8 mikrosekuntia kaavan 4, 8 ja 9 mukaisesti. Sama aikavakio voidaan toki saada äärettömällä määrällä kapasitanssien ja resistanssien yhdistelmiä. Koska kondensaattori latautuu tyristorin ollessa estotilassa ja purkautuu sen liipaistuessa, vaikuttaa myös kytkentätaajuus, tai yleisimmin verkkotaajuus, häviöiden määrään. Kyseessä on siis aina optimointitehtävä, eikä vain yhtä oikeaa ratkaisua ole olemassa.

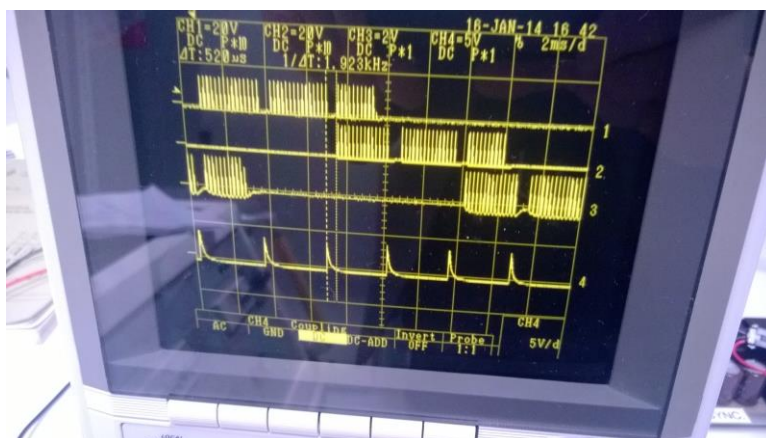
#### 7.4 Prototyypin koestaminen

Kun piirikortit ja tehoaste olivat kasassa, voitiin siirtyä prototyypin koestamiseen laboratoriossa. Ensimmäiseksi haluttiin selvittää, että sytytysyksikkö toimii suunnitellulla tavalla, ennen varsinaisen tehoasteen ja 400 V verkon liittämistä. Kuvassa 32 on esitettyä ohjausyksikkö kytkettynä verkkojännitteeseen ensimmäistä kertaa.



KUVA 32. Savukoe

Piirikortin toimintaa tarkasteltiin erilaisissa toimintapisteissä ja eri ohjauskulmilla. Kuvassa 33 on esitettyä kortin lähtöjä ja sisäisiä signaaleja.



KUVA 33. Sytytyspulssit ja tahdistussignaalit

Kuvassa 33 ylimmäisenä ovat sillan ylempien haarojen sytytyskammatt ohjauskulman ollessa noin  $18^\circ$ . Näiden alapuolella näkyy sytytysyksikön sisäinen tahdistussignaali, joka varmistaa, että jokainen johtovuoroon tuleva tyristori saa täyden hilapulssin.

Tässä vaiheessa koestusta havaittiin, että kampageneraattorin tahdistus ei toiminut aivan halutulla tavalla ja osittaisia aloituspulsseja pääsi välillä syntymään. Ongelma ratkaistiin lisäämällä hila-ajureiden käyntilupasignaaliin noin  $15 \mu\text{s}$  viivettä, jolloin vain kokonaiset hilapulssit pääsivät läpi. Samalla lisättiin kortin hilalähtöihin hilan ja katodin välille  $220 \text{ nF}$  kondensaattorit. Yhdessä  $22 \text{ ohmin}$  hilavastusten kanssa nämä muodostavat RC-piirin, joka syö nopeita häiriösignaaleja pois hilalähdöstä, vähentäen tahattoman syttymisen riskiä.

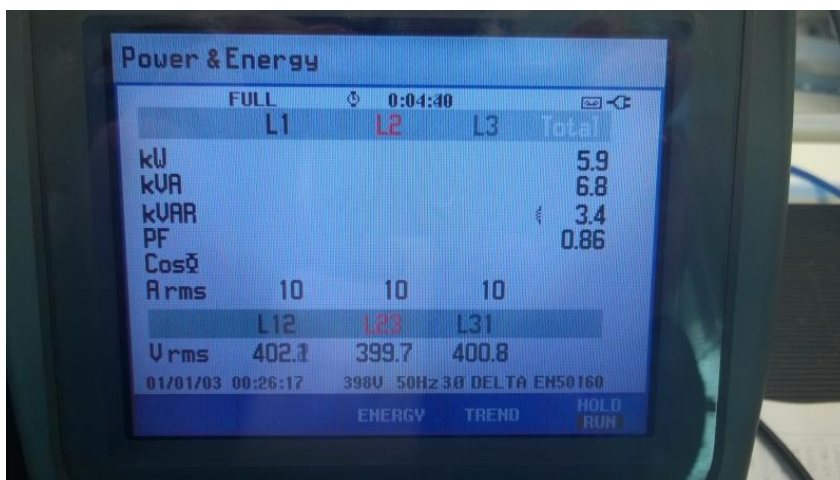
Kun ohjauksen todettiin olevan kunnossa, voitiin kytkeä tehoasteelle virta. Koe-  
stuksissa käytettiin resistiivistä kuormitusta yhdessä  $80 \text{ mH}$  DC-kuristimen kanssa. Sillan kuormitukseen käytettiin kahta  $3,3 \text{ kW:n}$  kuormavastusta. Tehonsyöttö tapahtui suojaerotetun  $8 \text{ kVA:n}$  säätövaunun kautta. Tehonmittauksessa käytettiin Fluke 434 -analysaattoria ja sytytysyksikön sisäistä toimintaa seurattiin oskilloskoopin avulla. Koejärjestely on kuvassa 34.



KUVA 34. Koejärjestely

Ensimmäiseksi silta koestettiin luonnollisesti tasasuuntauskäytössä. Sillan jännite nostettiin säätövaunun avulla hitaasti ja eri mittasuureita tarkkaillen 400 V:iin. Kun kaiken todettiin olevan kunnossa, aloitettiin ohjauskulman viivästyttäminen.

Siltaa koestettiin tasasuuntauskäytössä maksimissaan 5,9 kW:n (6,8 kVA:n) teholla (kuva 35).



KUVA 35. Ensimmäiset koestukset. Ohjauskulma 18°



Kuvasta 35 käy ilmi tyristorikäyttöille ominainen huono tehokerroin. Täydelläkin ohjauskulmalla verkosta otetun virran tehokerroin on vain 0,86. Luonnollisestikin tehokerroin on riippuvainen tyristorien ohjauskulmasta, sillä ohjauskulma on luvun 3.5 kuvan 9 mukaisesti myös virran vaihe-erokulma. Tämän lisäksi verkosta otettu virta on voimakkaasti palkittunutta, aiheuttaen yliaaltosisältöä verkkovirtaan. Kuvassa 36 on esitettyä verkkovirran yliaaltospektri ohjauskulman ollessa  $18^\circ$ .



KUVA 36. Virran yliaaltospektri. Ohjauskulma  $18^\circ$

Kuvasta 36 on hyvä huomioda ainakin se, että yksivaiheiseen prototyyppiin verrattuna kolmatta yliaaltoja ei enää esiinny, mikä on tyypillistä 6-pulssikäyttöille. Tämä on loogista, sillä kun nollajohdinta ei ole käytössä, ei myöskään siihen summautuvaa kolmatta yliaaltoja voi esiintyä.

Siltaa kuormitettiin noin kuuden kilowatin teholla kaksikymmentä minuuttia ja samalla tarkasteltiin komponenttien lämpenemistä. Tyristorimoduulien jäähdytyselémentti saavutti noin  $50^\circ\text{C}$  loppulämpötilan ilman pakotettua ilmanvaihtoa ja RC-suojien vastukset saavuttivat noin  $60^\circ\text{C}$  lämpötilan. Kondensaattorit lämpenivät vain muutamia asteita. Koska lopullisessa versiossa on tarkoitus käyttää pakotettua ilmanvaihtoa pelkän konvektion sijasta, ei tämän tarkastelun perusteella häviötehojen ei pitäisi nousta ongelmaksi. Kuvassa 37 on lämpökamerakaappaus sillasta, joskaan jäähdytysripa ei näy siinä oikealla tavalla kiiltävän alumiinipinnan poikkeavan emissiivisyyden takia.

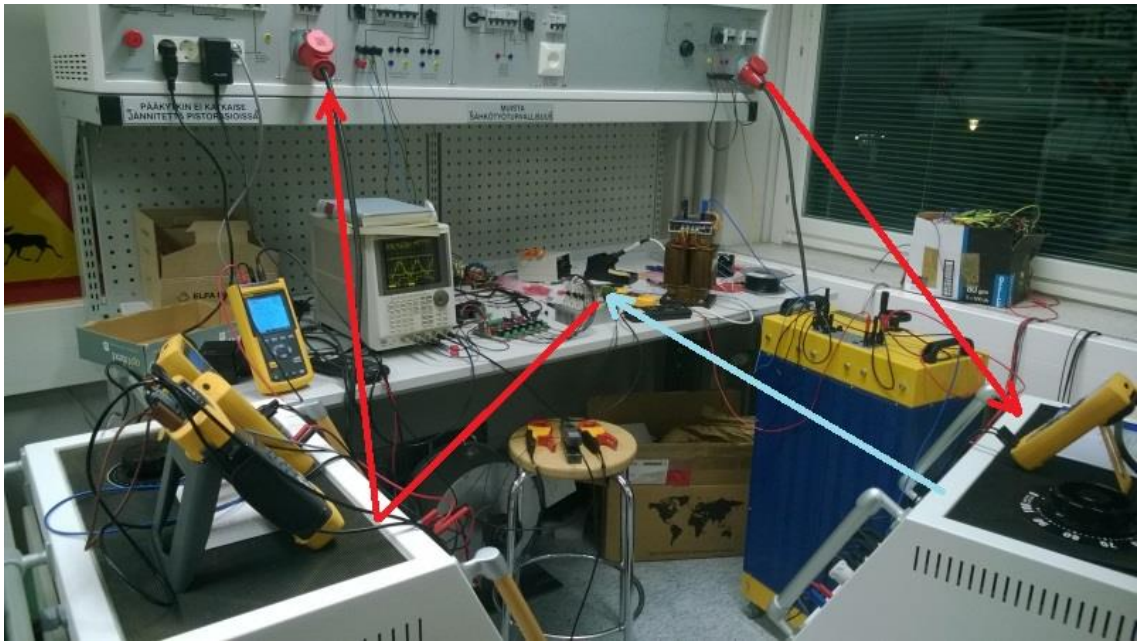


KUVA 37. Lämpökuva tehoasteesta

Kuten kuvasta 37 käy ilmi, tyristorimoduulien lämpötila pysyy hyvin hallinnassa. Oikealla ylhäällä olevat RC-suojan tehovastukset ovat suurin yksittäinen lämmönlähde.

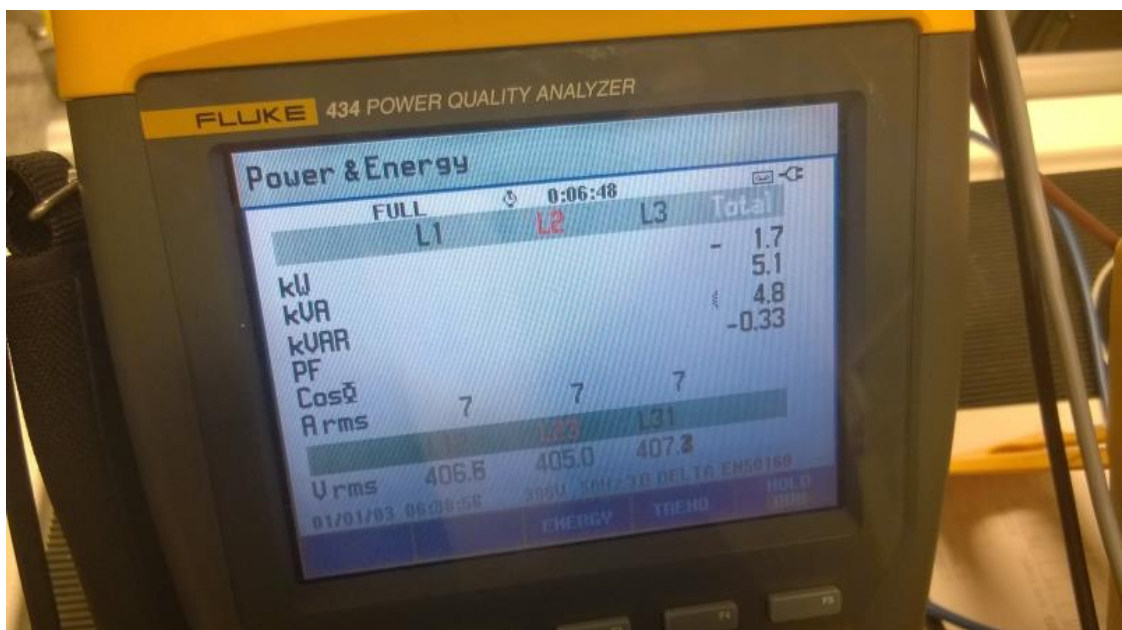
Kun tasasuuntauskäytön todettiin toimivan halutulla tavalla, siirryttiin vaihtosuuntauskäytön koestukseen. Koska käytössä ei ollut toista tyristorisiltaa jolla olisi voitu toteuttaa kaksisuuntainen tehonsiirto, päädyttiin käyttämään toista säätövaunua ja normaalia 6-pulssitasasuuntaajaa tehon syöttämiseksi tyristorisillalle. Koska vaihtosuuntauskäytössä on mahdollista saada aikaiseksi läpijohdotilanne, lisättiin DC-kiskoon noin 10 ohmin sarjavastus rajoittamaan mahdollista vikavirtaa kippaustilanteessa. Koejärjestely on esitettyä kuvassa 38. Tehon kulkusuunta käy ilmi nuolien perusteella; Punaiset nuolet ovat 400 V AC yhteyksiä, sininen kuvaa 560 V DC-yhteyttä.





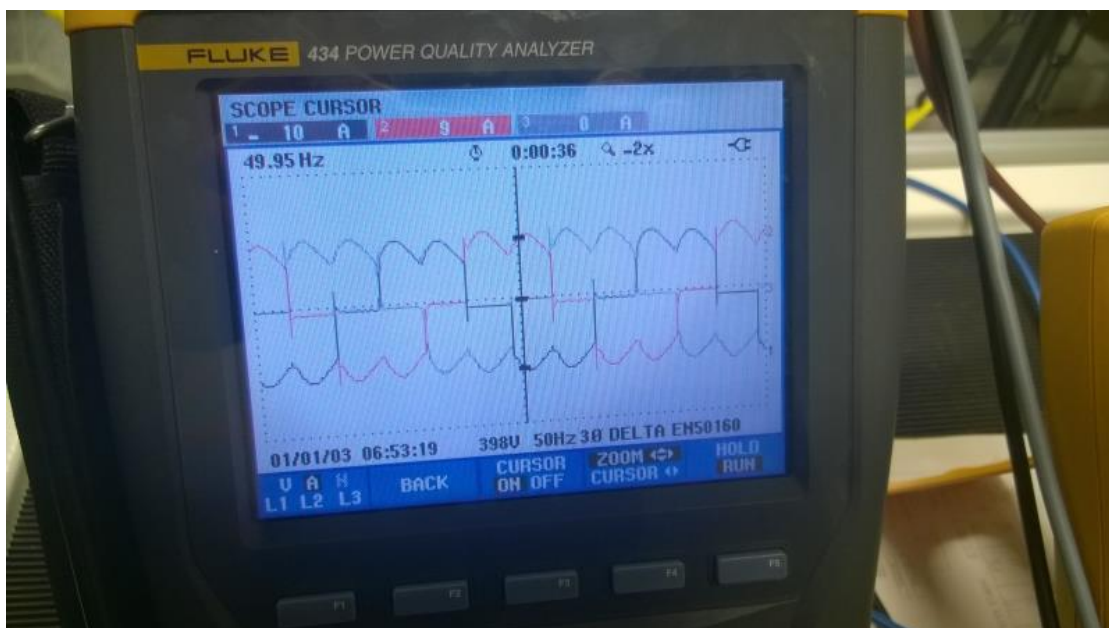
KUVA 38. Koejärjestely

Säätövaunun 6-pulssilähtö kytkettiin vastarinnan tyristorisillan kanssa ja tyristorisillan ohjauskulma aseteltiin noin  $120^\circ$ :een. Tämän jälkeen alettiin nostaa syöttävän säätövaunun jännitettä, kunnes teho alkoi virrata säätövaunulta sillalle. Kuvasta 39 voidaan todeta 1,7 kW:n tehon virtaavan takaisin verkkoon päin.



KUVA 39. Vaihtosuuntaus

Kuvassa 40 on verkkovirran aaltomuoto vaihtosuuntauksessa, joskaan tämä ei poikkea tasasuuntauksen vastaavasta aaltomuodosta.



KUVA 40. Verkkovirran aaltomuoto

Kokeiden perusteella prototyyppi todettiin toimivaksi. Saatujen tulosten pohjalta voitiin lähteä kehittämään lopullista versiota sytytysyksiköstä.

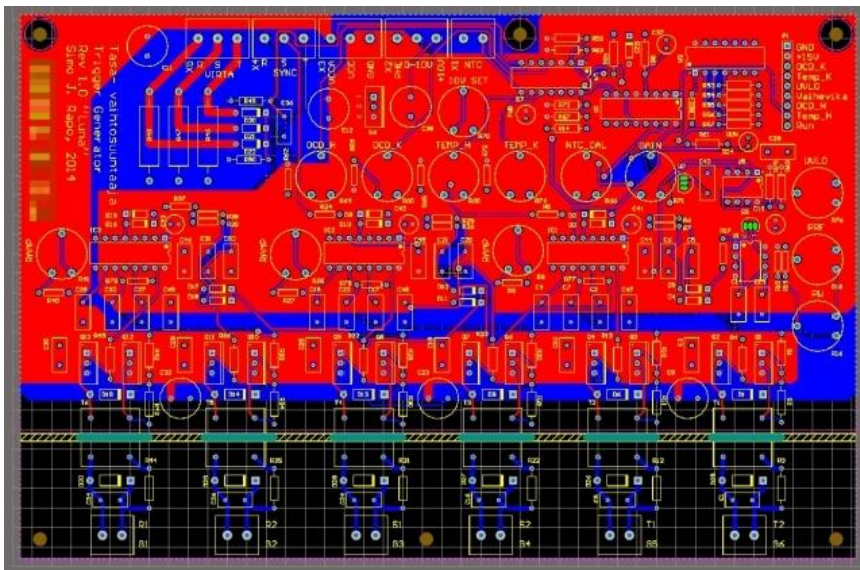
## 8 TUOTANTOVERSION TOTEUTUS

Aiempien prototyyppien ja niistä saatujen kokemusten pohjalta siirryttiin ohjausjärjestelmän korttien lopullisten versioiden toteuttamiseen. Tämä työvaihe jakautui viiteen osa-alueeseen seuraavasti:

1. Piirikorttikuvien tuotanto
2. Mekaniikkamallin luonti
3. Lopullisten korttien painatus
4. Korttien kalustaminen
5. Korttien koestaminen

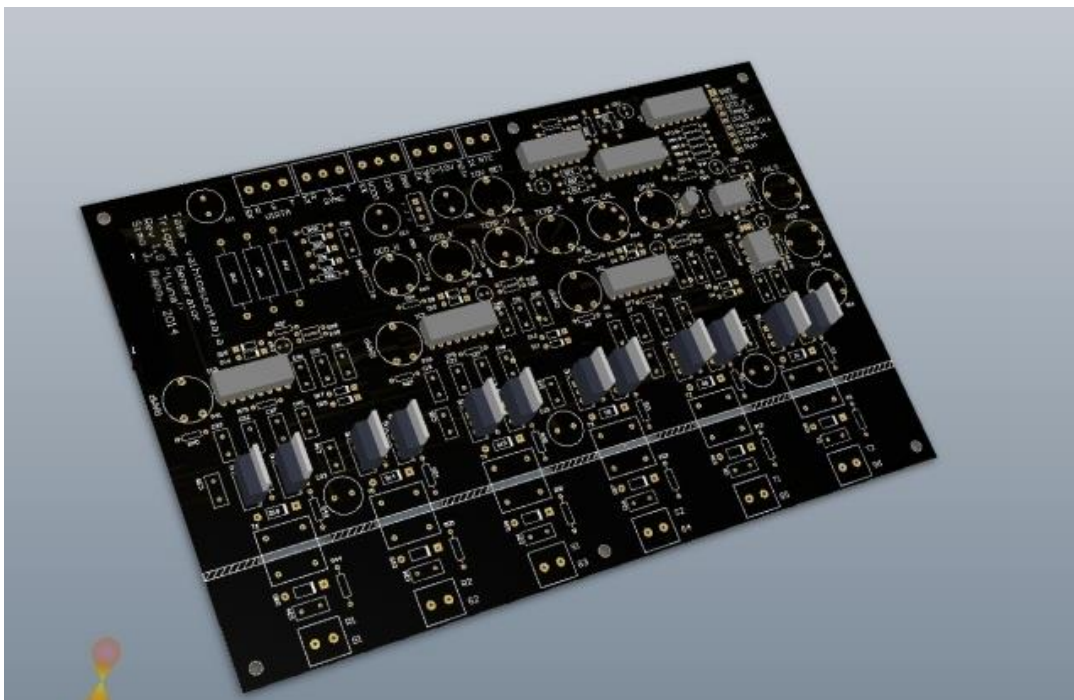
### 8.1 Piirikorttien CAD -mallit

Kuvassa 41 on esitettyä matalaresoluutioinen kaappaus sytytysyksikön piirikorttikuvasta eri kerroksineen. Kuvassa näkyvät muunmuassa käyttöjännitekerrokset, alareunan pulssimuuntajien eristysrajat sekä merkintäpainatus.



KUVA 41. Sytytysyksikön piirikorttikuva

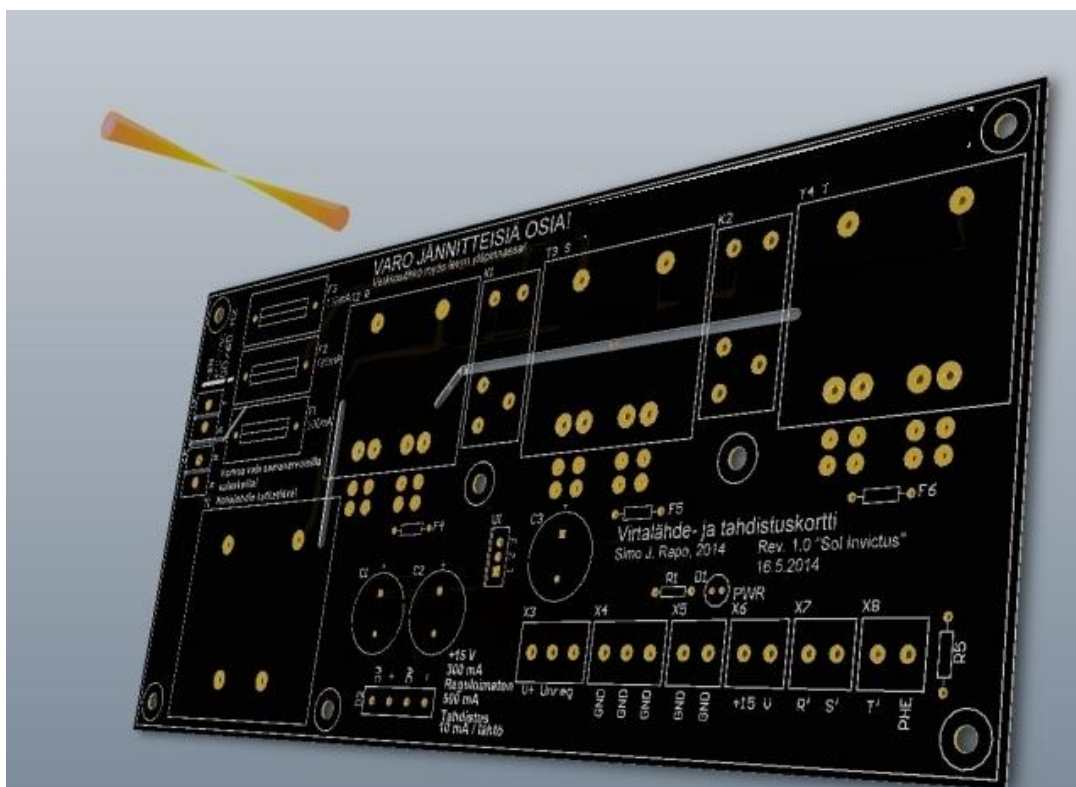
Ohessa on myös samasta kortista luotu 3D mallinnus (Kuva 42), jossa osalle komponenteista on luotu tai tuotu sisään oma kolmiulotteinen jalanjälkensä. 3D-mallista käyvät ilmi kortin juotteeneston väri ja merkintäpainatuksen asemoinnit, fontit ja väri, sekä valmiin kortin fyysinen muoto.



KUVA 42. 3D-mallinnus sytytysyksiköstä

Myös tahdistusmuuntajakortista tuotettiin piirilevykuvat tuotantoa varten. Tälle kortille ei kuitenkaan ajanpuutteen vuoksi ollut järkevää tuottaa omia 3D-mallejaan, joten kortti esiintyy mallinnuksessa kalustamattomana. Kalustamaton mallinnus on esitettyinä kuvassa 43.





KUVA 43. Tahdistusmuuntajakortin 3D-malli

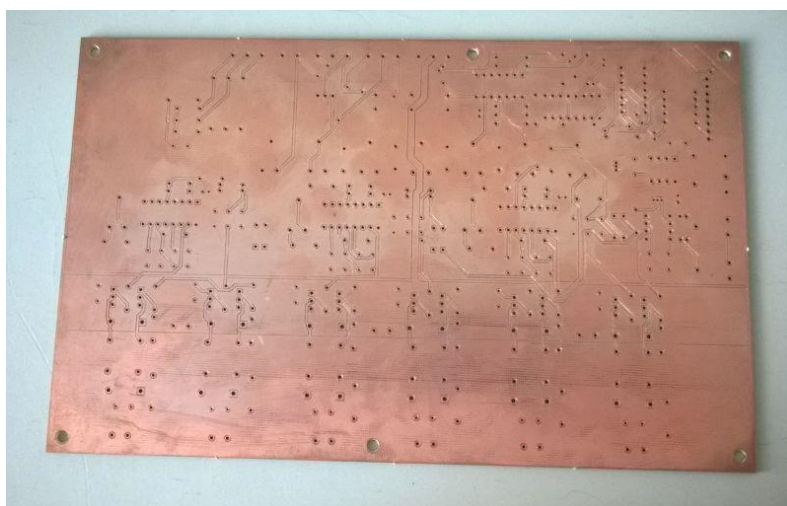
Kuvan 43 mallinnuksesta nähdään muun muassa piirikorttimuuntajien, sulakkeiden ja liittimien jalanjäljet silkipainatuksessa, sekä levyyn jyrstävät eristysrajat vaihtosähköverkkoon liittyvien osien ja matalajännitepuolen komponenttien välillä. Eristysrajojen tarkoituksena on estää verkkojännitteen päätyminen ohjausjännitepuolelle esimerkiksi levyjen likaantumisen tai transienttipiikkien seurauksena.

## 8.2 "Nollasarja"

Ennen painatettujen levyjen tilaamista sytytysyksiköstä jyrstiin esituotantoversio käyttäen CNC-jyrshintä (kuva 44). Valmiin kortin jyrsiminen oli yksi Altium Designer-kurssin tavoitteista, joten se syntyi hieman sivutuotteena, joskin hyödyllisenä sellaisena. Tämän levyn tarkoituksena ei ollut olla sähköisesti toimiva versio sytytysyksiköstä, vaan enemmänkin mekaniikkamalli.

Tärkein este jyrityn levyn toiminnalle on se, että levyn toiminta luottaa hyvin pitkälti läpiholkitukseen, ts. mahdollisuuteen yhdistää levyn eri puolien signaali- ja käyttöjännitekerroksia johtavien läpivientien kautta. CNC -jyrityyn levyyn ei ollut mahdollista tehdä tällaista holkitusta.

Kuitenkin, CNC -jyrityä esituotantoversiota käytettiin mekaniikkamallina, jolla varmistettiin komponenttien jalojen yhteensopivuus fyysisessä maailmassa ja komponenttien jaloille varattujen reikäkokojen riittävyys. Samalla pystyttiin myös tarkistamaan hieman langoitusten oikeellisuutta ja pystyttiin varmistumaan siitä, että tuotetut Gerber-tiedostot ovat tuotantokelpoisia ennen suhteellisen arvokkaiden painettujen levyjen tilaamista.



KUVA 44. Mekaniikkamalli

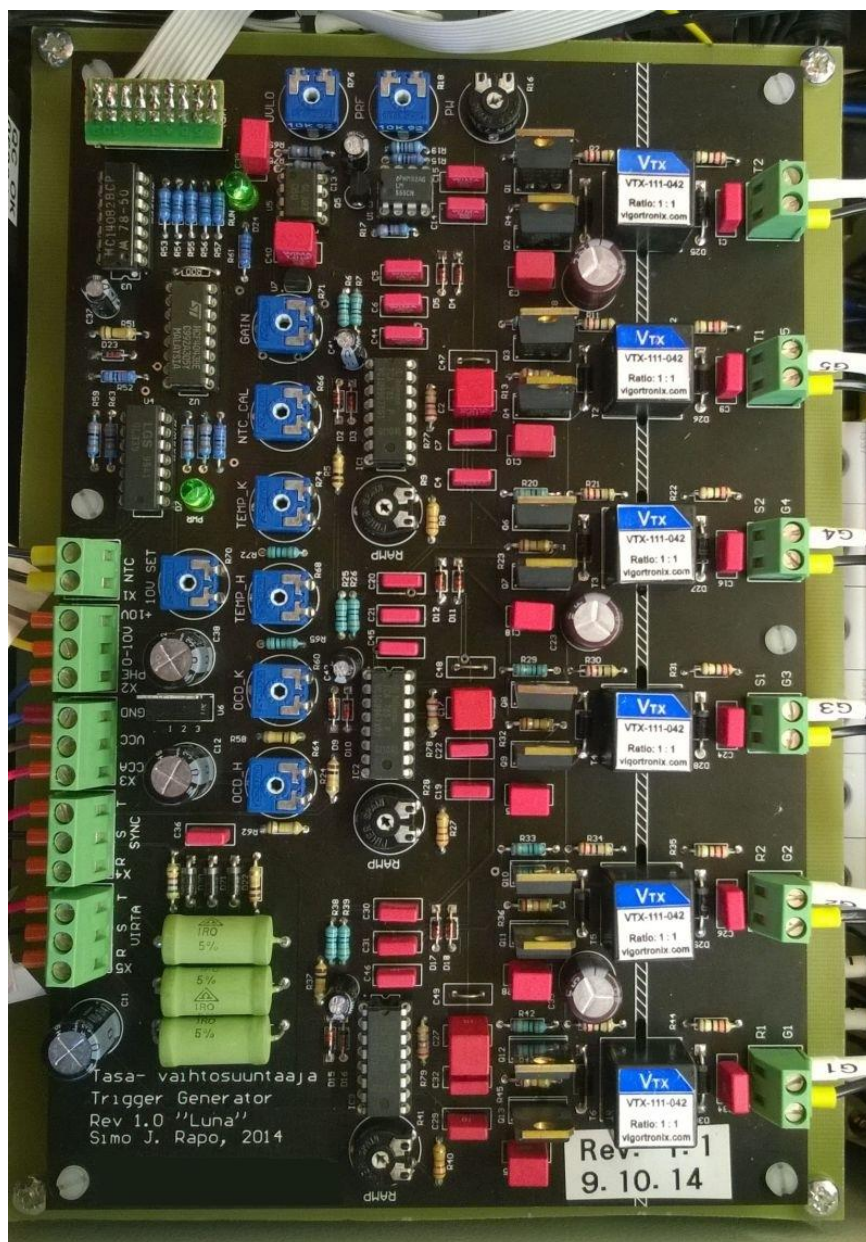
Kuten kuvasta 44 hyvin käy ilmi, tässä prototyypissä ei ole poistettu ylimääräistä kuparia levyn pinnasta, toisin kuin levyllä tarvittavat eristysrajat vaatisivat. Tähän syynä on se, että CNC-jyritys on hidas prosessi, jossa jokainen langoitus täytyy kiertää jyrityksen terällä. Samaten jokainen poistettava kuparialue täytyy erikseen jyrityä pois levyn pinnasta.

Sytytysyksikössä on yli kuusisataa langoitusta ja se sisältää suuria eristysvälejä, joiden täydelliseen jyritykseen olisi kulunut kohtuuttomasti aikaa. Täten mallia toteutettaessa päätettiin, että ylimääräistä kuparia ei poisteta levytä.

### 8.3 Sytytysyksikkö – ”Luna”

Sytytysyksikkö on koko projektin keskeisin ja samalla haastavin yksittäinen osakokonaisuus. Lopullista versiota varten tehty kortti noudattaa toimintalogiikaltaan samaa mallia kuin aikaisempi kolmivaiheinen prototyyppi. Erona versioiden välillä on se, että lopullisessa versiossa on sytytysyksikön kortille integroitu laitteiston vaatimat pehmeät suojaukset. Kortilta löytyvät niin ylivirran kuin yllilämmönkin suojaukset, kuin myös +15 V:n apujännitteen alijännitesuojaus (*UVLO, Under Voltage Lock-Out*). Lisäksi kortti sisältää option yksittäisen vaiheen vikaantumisesta aiheutuvalla vikakatkaisulle. Suojaukset varmistavat sen, että järjestelmä ajetaan vian sattuessa oletusarvoisesti turvalliseen tilaan ilman, että sulakesuojaus ehtii puuttua asiaan.

Kortissa käytettiin perinteistä läpiladottavaa tekniikkaa ja se on kaksikerroksinen. Valmiiksi kalustettu (ja laitteistoon asennettu) kortti on kuvassa 45.



KUVA 45. Kalustettu sytytysyksikkö

Kortin tuloliittimet ovat kuvan vasemmassa laidassa, hilaohjauksen lähdöt puolestaan oikealla. Oikeassa reunassa näkyvät myös sinivalkoiset pulssimuuntajat ja välittömästi niiden vieressä hila-ajurien tehoasteet transistoripareineen ja paikallisine elektrolyyttikondensaattoreineen. TCA785-vaiheohjauspiirit ovat rivissä kortin keskellä. Yläreunassa näkyy 555-ajastinpiirillä toteutettu sytytyskamppageneraattori. Suojaus- ja ohjauslogiikka sijaitsee kortin vasemmassa ylänurkassa; Sytytysyksikön tilaindikointitiedot ovat saatavissa vasemman yläkulman liittimeltä. Vasemmassa alanurkassa ovat laitteiston virtamuuntajien kuormavastukset. Sytytysyksikön säätöpotentiometrit sijaitsevat rivissä kortin vasemmalla



reunalla. Sytytysyksikkö sisältää kaikkiaan 201 komponenttia ja yli 600 läpiholkittua reikää. Yhden kortin kalustamiseen käsityönä kuluu noin kolmesta neljään tuntia.

Kuten kuvan 45 merkinnöistä voidaan havaita, kortti sisältää laajan skaalan erilaisia säätömahdollisuuksia trimmeripotentiometrin muodossa. Saatavilla olevat säätömahdollisuudet ovat taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Säätöpotentiometrit

Nro.	Nimi levyllä	Osa nro.	Vaikutus
1	OCD_h	R64	Ylivirtasuojan hälytysraja
2	OCD_k	R60	Ylivirtasuojan katkaisuraja
3	Temp_h	R68	Lämpösuojan hälytysraja
4	10V_set	R70	Asettaa 10/5 V ulkoisen ohjausjännitteen
5	Temp_k	R74	Lämpösuojan katkaisuraja
6	NTC_cal	R66	Lämpöanturin kalibrointi
7	GAIN	R71	0...10/5 V etuskaalaimen kalibrointi
8	UVLO	R76	+15 V käyttöjännitteen alijännitesuoja
9	PW	R16	Hilapulssituksen pulssinleveys
10	PRF	R18	Hilapulssituksen taajuus
11...13	RAMP	R41/28/9	TCA785 sytytysrampin säätö

Kortissa on mahdollisuus niin paikalliseen, kuin ulkoiseenkin ohjaukseen. Ohjauskuulmatieto tuodaan sisälle korttiin oletusarvoisesti 0...5 V signaalina. Ulkoiseen ohjaukseen oli tarkoitus alun perin käyttää 10 V ohjausta, mutta myöhemmässä vaiheessa päädyttiin käyttämään 5 V jännitettä, joten merkintäpainatuksen 10 V\_set on hieman harhaanjohtava jäännös. Suurempi ohjausjännite vastaa suurempaa ohjauskuulmaa. Ohjauskuulma käyttäytyy lineaarisesti ohjesignaalin suhteen.

Kortilta on myös saatavilla laaja valikoima tilaindikointeja ulos. Nämä tiedot voidaan yhdistää esimerkiksi etupaneelissa sijaitsevaan LED- rivistöön. Saatavat

indikointitiedot ovat taulukossa 5. Taulukossa toiminnolla tarkoitetaan liittimen logiikkatasoa normaalissa toimintatilanteessa. NC tarkoittaa, että liittimen logiikkataso on korkea normaalissa toimintatilanteessa, NO puolestaan alhaista logiikkatasoa normaalissa toiminnassa. N/A tarkoittaa, että liittimen logiikkataso pysyy muuttumattomana riippumatta käyttötilanteesta (käyttöjännitetasot). Jokainen indikointinasta on puskuroitu 1500 ohmin sarjavastuksen läpi, joten ne soveltuvat sellaisenaan LED-valon tai ulkoisen logiikan ohjaukseen.

TAULUKKO 5. Indikointitiedot

P1, nro.	Nimi levyllä	Toiminto	Indikointi
1	GND	N/A	Maa, 0 V
2	+15V	N/A	Käyttöjännite
3	OCD_K	NC	Ylivirtasuoja toiminut; käynninesto
4	Temp_K	NC	Ylilämpösuoja toiminut; käynninesto
5	UVLO	NC	15V alijännitesuoja toiminut; käynninesto
6	Vaihevika	NC	Syöttävä vaihe puuttuu; käynninesto
7	OCD_H	NO	Ylivirtasuojan hälytysraja saavutettu
8	Temp_H	NO	Ylilämpösuojan hälytysraja saavutettu
9	RUN	NO	Käyntitilatieto (käy/seis, "vaihtokärki")

### 8.3.1 Sytytysyksikön koestus ja kalibrointi

Kalustettuun sytytysyksikköön kytkettiin ulkoinen +15 V käyttöjännite ja todettiin, että välittömiä vikoja ei ilmennyt. Tämän jälkeen suoritettiin kortin sisältämien suojausien ja signaaligeneraattoreiden kalibrointi seuraavan listauksen mukaisesti:

1. UVLO säädettiin kytkeytymään aktiiviseen tilaan käyttöjännitteen laskiessa alle 13,0 V:iin. Suojauksen toiminta koestettiin sekä alentamalla käyttöjännitettä tasaisesti, että aiheuttamalla syöttävälle lähteelle hetkellinen oikosulku.
2. 5 V ulkoinen ohjausjännite säädettiin 5 V:iin
3. Sytytyspulssin leveys (PW) säädettiin arvoon 10  $\mu$ s
4. Sytytyskamman taajuus (PRF) säädettiin arvoon 4 kHz
5. Vaiheohjauspiirien ramppigeneraattorit aseteltiin alkamaan samasta pisteestä

Tässä vaiheessa havaittiin, että kaksikkokomparaattorin U5 toiset tulonastat, liitinnumerot 2 ja 3, olivat vaihtuneet keskenään, estäen 0...5 V esiskaalaimen toiminnan. Piiri asennettiin kantaansa vinottain siten, että nastojen järjestys voitiin vaihtaa. Kortti toimi tämän jälkeen moitteettomasti. Virhe merkittiin seuraavaa korttierää silmällä pitäen ylös ja korjattiin seuraavassa revisiossa.

Alustavan kalibroinnin ja koestamisen jälkeen todettiin kortin olevan toimintakuntoinen.

#### 8.4 Tahdistuskortti – ”*Sol Invictus*”

Tahdistuskortti on huomattavasti yksinkertaisempi laite verrattuna sytytysyksikköön. Sen tehtävänä on tehdä galvaaninen erotus syöttävän 400 V verkon ja 15 V logiikan välillä ja muodostaa tahdistuksen tarvitsema 30° vaihesiirto haka-tähtikytkennän avulla. Tahdistusmuuntajien alajännitekäämien kytkennät on jätetty avoimiksi piirilevyllä, jotta muuntajien kytkentäryhmää voidaan tarvittaessa muuttaa.

Tahdistustiedon lisäksi kortti tuottaa tarvittavan +15 V käyttöjännitteen ja sisältää valvontareleet, jotka havaitsevat syöttävän verkon mahdolliset vaiheviat. Releiden kärjiltä lähtee indikointitieto sytytysyksikölle ja näin ollen vaihevika aiheuttaa vikakatkaisun. Valmiiksi kalustettu muuntajakortti on kuvassa 46.



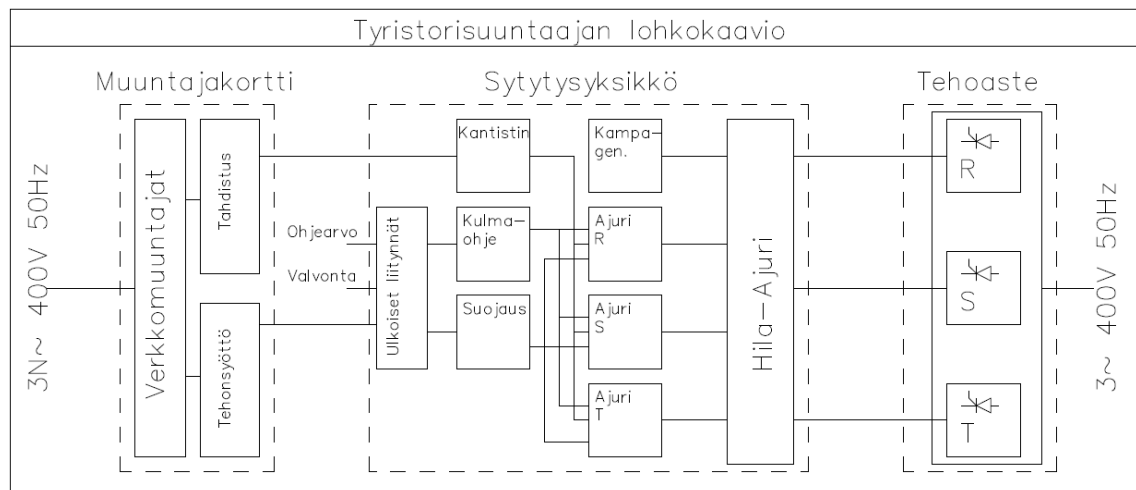
KUVA 46. Muuntajakortti

#### 8.4.1 Tahdistuskortin koestus

Muuntajakortti kytkettiin 400 / 230 V käyttöjännitteisiinsä. Ensimmäiseksi tarkastettiin +15 V käyttöjännitteen taso ja todettiin sen olevan toleransseissa. Seuraavaksi tarkastettiin ohjausmuuntajien toisiojännitteiden vaihekulmat, jotta voitiin varmistua kytkentäryhmän oikeellisuudesta. Lopuksi tarkastettiin vaihevikareleiden toiminta poistamalla yksi vaihe kerrallaan käytöstä. Todettiin kortin toimivan suunnitellulla tavalla.

### 8.5 Järjestelmän lohko- ja pulssikaavio

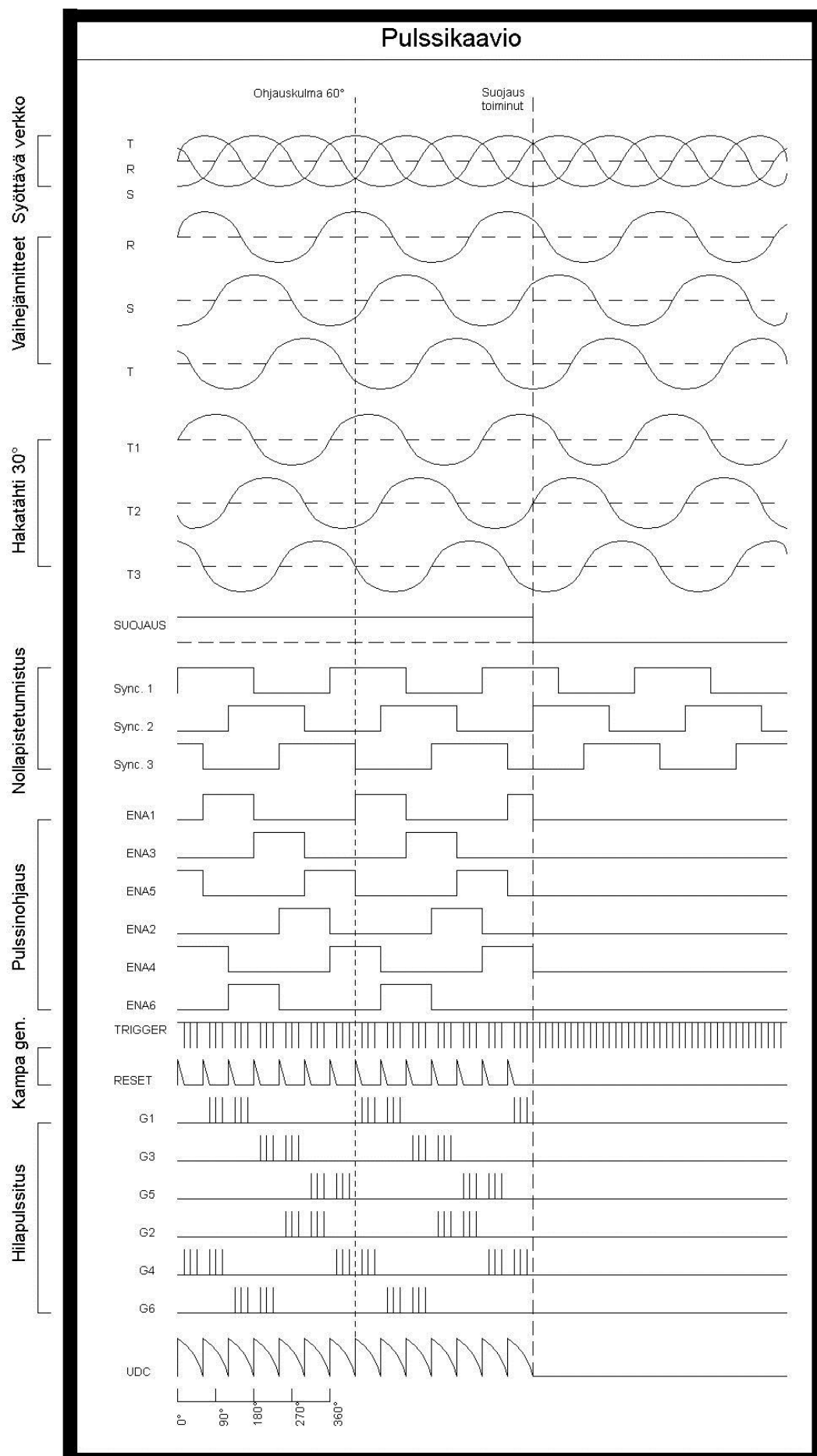
Koska kyseessä on jo suhteellisen monimutkainen laitteisto, oli sen toiminnasta järkevää luoda lohko- sekä pulssikaaviot. Lohkokaavioesitys sisältää laitteiston keskeisimmät osakokonaisuudet ja niiden vaikutussuhteet toisiinsa nähden (kuva 47).



KUVA 47. Järjestelmän lohkokaavio

Kuvan 47 lohkokaaviossa ovat eroteltuna laitteiston muuntajakortti, sytytysyksikkö ja tehoaste. Kaaviota luetaan vasemmalta oikealle. Nähdään, että muuntajakortti tuottaa sytytysyksikön tarvitseman käyttöjännitteen ja tahdistussignaaleita. Sytytysyksikkö generoi puolestaan tehoasteen tarvitseman hilaohjauksen ja tehoaste hoitaa varsinaisen tehonohjauksen. Ohjauskulmasäädön ja suojaustulojen kytkentöjä ei ole esitetty, sillä ne ovat sytytysyksikön ulkoisia osia. Myöskään tehoasteen etukojeita ei ole esitetty.

Lohkokaaviota täydentävä pulssikaavio on esitetty kuvassa 48. Kaaviossa esitetään samassa aikatasossa muuntajakortille ja sytytysyksikölle tulevat ja niiltä lähtevät signaalit, tässä tapauksessa verkkojaksoon suhteutettuna. Tarkoituksena on kuvata, mitä laitteisto kullakin ajanhetkellä ja kussakin käyttötilanteessa tekee. Kaaviossa esitettyjen signaalien aaltomuodot ovat suurpiirteisiä ja idealisoituja kuvaajia, eivätkä niiden amplitudit ole mittakaavassa toistensa suhteen.



KUVA 48. Täydellinen pulssikaavio

Kaaviota luetaan ylhäältä alas ja vasemmalta oikealle. Nähdään, että vaihejännitteistä muodostetaan hakatähtikytkennällä  $30^\circ$  vaihejännitettä jäljessä oleva synkronointisignaali, joka vastaa sillan luonnollista kommutointihetkeä. Tämä signaali tuodaan muuntajakortilta sytytysyksikölle, jossa se syötetään 10 kilohmin vastuksien läpi diodeilla muodostetulle kantistimelle, jolloin saadaan nolapistetunnistukseen tarvittavat signaalit. Tämä vaihetieto syötetään ajuripiireille, jotka toteuttavat vaiheohjauksen vaatiman kulmaviiveen. Piirit syöttävät halutulla sytytyshetkellä ulos ENABLE-signaalin (käyntiluvan) hila-ajureille.

Jokainen nouseva ENABLE-signaalin reuna toteuttaa nopean RESET-pulssin kampa-aaltogeneraattorille, jonka mukaan generaattori tahdistuu. Näin varmistetaan siitä, että johtovuoroon tuleva tyristori saa aina kokonaisen ohjauspulssin hilalleen. Samalla varmistetaan myös jokaisen ohjaushetken samanaikaisuus verkkojaksojen välillä, jolloin ohjauskulmassa ei esiinny jaksosta jaksoon ilmevä huojuntaa.

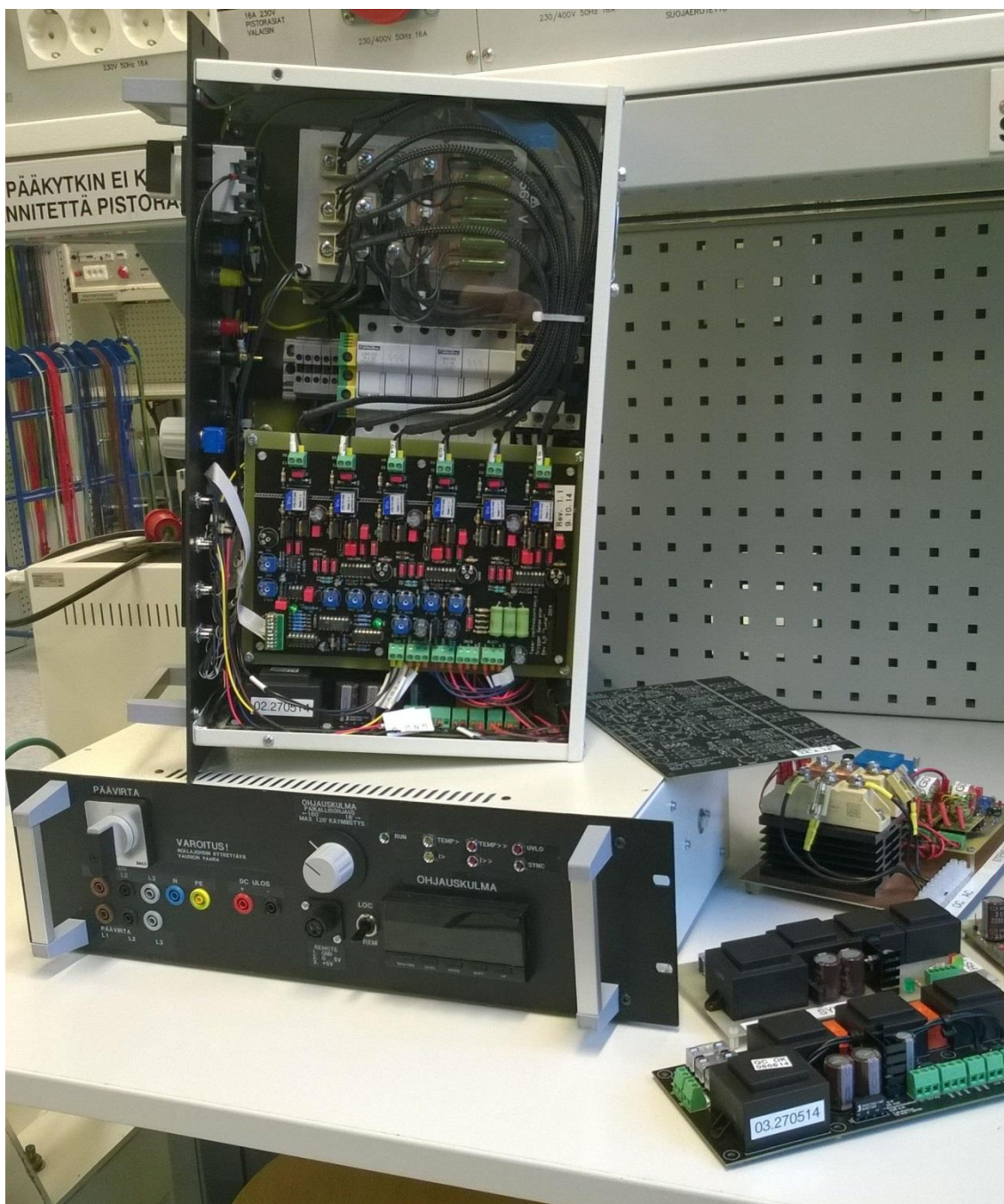
ENABLE-signaali summautuu hila-ajurissa yhteen kampa-aaltogeneraattorin luoman TRIGGER-signaalin kanssa. Näiden summana muodostuvat hilaohjaussignaalit G1...G6, jotka syötetään pulssimuuntajan läpi ohjattavien teholaitteiden hiloille.

Alimmaisena kaaviossa nähdään ohjattavan sillan teoreettinen lähtöjännitteen aaltomuoto esitetyllä ohjauskulmalla.

Järjestelmän suojaus on toteutettu yksinkertaisesti siten, että ajuripiirien INHIBIT-tulot on kytketty yhteen. Normaalissa käyttötilanteessa INHIBIT-signaali on vedetty ylös. Kun suojauslogiikka havaitsee vian, ohjataan INHIBIT-signaali alas, jolloin hilapulssitus katkeaa. Todennäköiset vikatilanteet joita vastaan halutaan suojautua aiheuttamalla vikakatkaisu, ovat yllämpö, ylivirta, +15 V käyttöjännitteen alijännite sekä synkronointivaiheen puuttuminen, kuten kohdassa 8.3 on käsitelty.

## 9 LAITTEISTOJEN KOKOONPANO

Laitteistot kasattiin standardimuotoisiin, 19 tuumaisiin 3U (133,35 mm) korkuisiin rakkikoteloihin. Valmiit laitteistot ovat kuvassa 49.



KUVA 49. Valmiit laitteistot

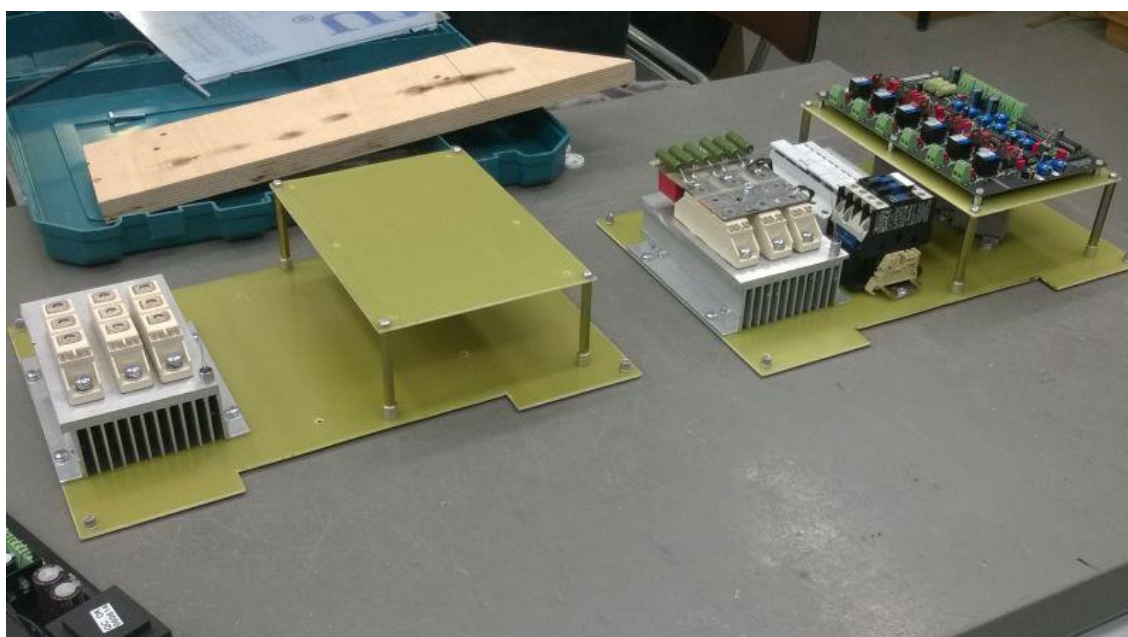


## 9.1 Komponenttisijoittelu

Laitteiston komponentit koottiin siten, että suurjännitteiset osat sijaitsevat kotelon vasemmassa laidassa (etupuolelta katsottuna) ja matalajännitteiset osat puolestaan oikeassa laidassa. Näin saatiin hieman erotusväliä ohjauslaitteiston ja verkkojännitteisten osien välille – joskin molemmille ohjauskorteille tulee myös verkkojännitteisiä syöttöjä, joten raja on näiltä osin hieman hämärä.

Tyristorisilta sijaitsee laitteiston vasemmassa laidassa. Sen vieressä sijaitsevat DC-kiskoston sulakkeet, sekä sillan AC-syötön erotuskontaktori. Vaihevirran mittaukseen käytetyt virtamuuntajat sijaitsevat sytytysyksikön kortin alla. Sytytysyksikön kortti sijaitsee korotetun levyn päällä kotelon oikeassa laidassa. Sen vierelle, oikealle seinälle on asennettuna laitteiston tahdistus- ja virtalähdekortti.

Komponenttisijoittelussa pyrittiin kiinnittämään huomiota laitteiston sähköturvallisuuden ja mekaanisen kestävyyslisäksi myös laitteiston huollettavuuteen. Komponenttien kiinnitystä varten tehtiin rakkikoteloihin sopivat kehikot 2.5 mm FR-4 levystä (Kuva 50). Tyristorisillan jäähdytysprofiilin alla olevaan laminaattiin jyrsittiin reikä, jotta jäähdytysilma pääsee virtaamaan profiilin läpi.



KUVA 50. Kehikot

Komponentteja koesovitettiin toistuvasti koteloiden työstämisen aikana, jotta voitiin varmistua osien sopivuudesta (kuva 51).



KUVA 51. Koesovitus

## 9.2 Lämmönhallinta

Tyristorisilta asennettiin alumiiniseen jäähdytysprofiiliin, joka sijaitsee kotelon vasemmassa reunassa. Sillan takana, laitteen takapaneelissa, on 80 mm laitepuhallin, joka imee ilmaa kotelon alaosan ilmanottoaukoista sisään, vetäen sen jäähdytysprofiilin läpi ja puhaltuen lämpimän ilman ulos kotelon takaosasta. Puhallin toimii 230 V käyttöjännitteellä ja on yhdistetty päävirtakytkimeen siten, että se pyörii aina päävirran ollessa kytkettynä.

Pakotettu ilmanvaihto varmistaa sen, että kotelon sisäinen lämpötila pysyy lähellä huonelämpöä, eivätkä yksittäiset komponentit pääse siten kuumenemaan liiallisesti. Käytettäessä näin matalaa tehotasoa olisi jäähdytyksen voinut toteuttaa myös passiivisesti. Valitun kotelointityypin vuoksi tämä ei kuitenkaan ollut helposti toteutettavissa, joten päädyttiin pakotettuun ilmanvaihtoon.

### 9.3 Etupaneeli

Laitteen etupaneeli on 3 mm vahvuista mustaksi anodisoitua alumiinia. Se sisältää kaikki laitteen ulkoiset liitynnät ja ohjaustulot, indikaattorit sekä kytkimet (kuva 52).



KUVA 52. Etupaneeli

Etupaneelissa sijaitsevat:

- Päävirtakytkin
- Synkronointitulot
- AC-virransyöttö
- DC-ulostulo
- 0...5 V ohjaustulo
- Vaihekulman paikallisohtaus
- Local / Remote-kytkin (paikallis- / ulkoinen ohjaus)
- Ohjauskulman osoitus
- Indikointialue: Laitteiston käyntitila-, hälytys- ja vikatiedot

Näiden lisäksi etupaneeli sisältää kaksi kahvaa, yksi paneelin kummassakin reunassa. Ne parantavat laitteen siirrettävyyttä ja suojaavat etupaneelin kytkimiä ja liittimiä vaurioilta kuljetuksen ja varastoinnin aikana.

## 10 SUOJAUSTEN KALIBROINTI JA KOESTUS

Suojaukset oli jo aikaisemmin koestettu syöttämällä suojaustuloihin simuloituja arvoja, mutta lopullisessa laitteistossa ne koestettiin myös tosielämän tilanteissa. Koestaminen aloitettiin käyttäen alennettua syöttöjännitettä ja käyttäen virransyötössä pieniohmista sarjaresistanssia mahdollisen vikavirran rajaamiseksi. Alustavat käyttökokeet tehtiin käyttäen resistiivistä kuormitusta ja 80 mH sarjakuristinta. Kun laitteiston toiminta oli varmennettu, siirryttiin suojauksien kalibrointiin ja koestamiseen.

### 10.1 Ylivirtasuoja

Sillan ohjauskulma aseteltiin arvoon  $18^\circ$ , jolloin DC-jännite on maksimissaan. Tämän jälkeen lähdettiin nostamaan sillan syöttöjännitettä, jolloin suuntaajan verkosta ottama virta kasvaa. Jännitettä nostettiin, kunnes saavutettiin haluttu ylivirtavaroituksen raja. Säädettiin luvun 8.3 taulukon 4 mukaisesti trimmeripotentimetriä OCD\_h, kunnes etupaneelin ylivirtavaroitusmerkkivalo syttyi.

Katkaisuasteen asettelu tehtiin saman kaavan mukaisesti: sillan verkkovirta kasvatettiin haluttuun katkaisurajaan ja säädettiin trimmeriä OCD\_k, kunnes tapahtui ylivirtakatkaisu ja ylivirtakatkaisun merkkivalo syttyi.

### 10.2 Ylilämpösuoja

Lämpösuojan anturi irroitettiin sillan jäähdytysrivasta, jonka jälkeen anturin pää kastettiin  $60\text{ }^\circ\text{C}$  veteen. Anturin annettiin lämmetä jonkin aikaa, jonka jälkeen säädettiin trimmeripotentimetriä Temp\_h, kunnes ylilämmön merkkivalo syttyi.

Tämän jälkeen vesihaude kuumennettiin lämpötilaan  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , jonka jälkeen säädettiin trimmeripotentimetriä Temp\_k, kunnes tapahtui ylilämpökatkaisu ja ylilämpökatkaisun merkkivalo syttyi.

### 10.3 Alijännitesuojaus

Alijännitesuojaus kalibroitiin ja koestettiin laskemalla ohjausjännitteen arvoa säätövaunulla, kunnes regulaattorin syöttämä jännite oli enää 13 V. Säädettiin alijännitesuojan trimmeriä (UVLO, *Under Voltage Lock-Out*) kunnes tapahtui alijännitekatkaisu ja alijännitesuojan merkkivalo syttyi.

Tämän jälkeen tehtiin +15 V kiskoon hetkellinen oikosulku, jonka aikana alijännitesuojan pitäisi myös aktivoitua. Todettiin, että alijännitesuoja toimii odotetulla tavalla.

### 10.4 Vaihevika

Vaihevikasuojaus koestettiin poistamalla syötöstä vuoron perään R- ja S-vaihe laitteen ollessa sammutettuna. (T-vaihe syöttää ohjauspiiriä, joten laite ei luonnollisestikaan toimi sen puuttuessa). Kun virta kytkettiin ohjauskytkimestä päälle, syttyi vaihevian merkkivalo ja hilapulssitus ei käynnistynyt.

Vaihesuojaus koestettiin tämän jälkeen uudemman kerran siten, että laitteen ollessa käynnissä poistettiin vuoron perään R- ja S-vaihe. Todettiin suojauksen oikea toiminta.

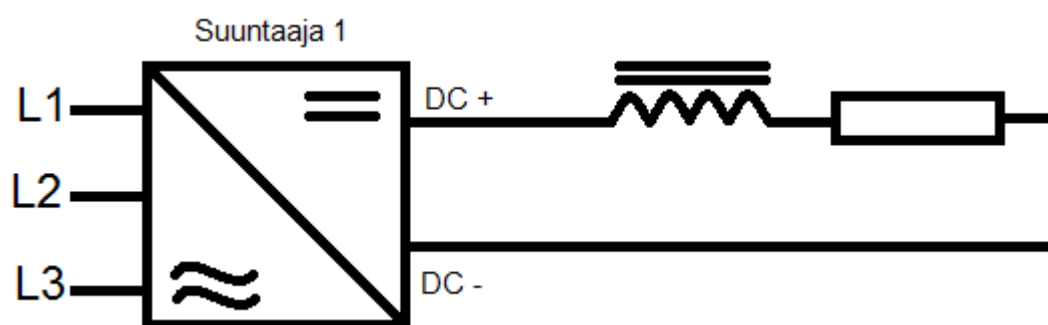
## 11 KÄYTTÖKOKKEET

Valmiille laitteille tehtiin käyttökokeet, joissa koestettiin niiden toimintaa ja soveltuvuutta sähkölaboratoriossa tehtäviin tyristorisuuntaajia hyödyntäviin töihin. Samalla tarkasteltiin suuntaajien ominaisuuksia ja verrattiin niitä kuusipulssikäytön periaatteelliseen toimintaan. Näin voitiin varmistaa laitteiden toimivan odotetulla tavalla.

Mittauksissa käytettiin Fluke 435-II tehoanalysaattoria ja Agilent DSO1012A oskilloskooppia.

### 11.1 Tasasuuntaus

Tasasuuntauskäyttö koestettiin kohdan 10 mukaisesti resistiivisellä kuormituksella käyttäen 80 mH sarjakuristinta. Kuormituksena käytettiin kahta sarjaan kytkettyä 3,3 kW kuormavaunua, joiden yhteenlasketuksi resistanssiksi oli asetettu 55  $\Omega$ . Kytkennän periaatteellinen kytkentä on kuvassa 53.



KUVA 53. Tasasuuntaustyön periaatekytkentä

Koekytkentään lisättiin myös DC-piirin virtamittaus, jännitemittaus ja vaihejännitteen mittaus. Näitä ei kuitenkaan käydä tässä yhteydessä läpi, sillä ne eivät ole tämän tarkastelun kannalta oleellisia. Koejärjestely on kuvassa 54.



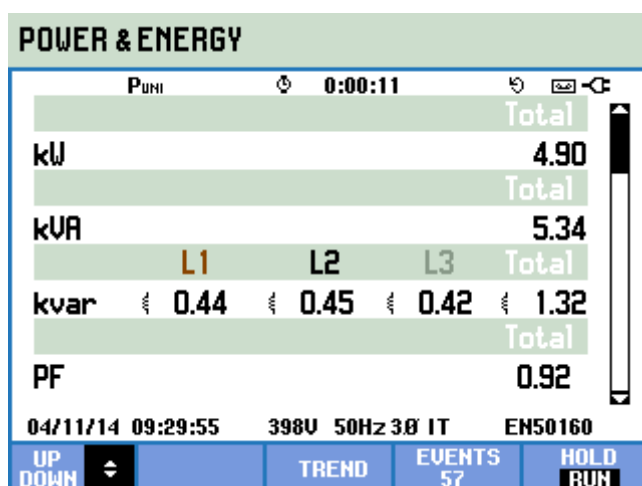
KUVA 54. Koejärjestely

Kokeet suoritettiin useilla ohjauskulman arvoilla. Tässä yhteydessä käydään näistä läpi kaksi.

#### 11.1.1 Ohjauskulma $18^\circ$

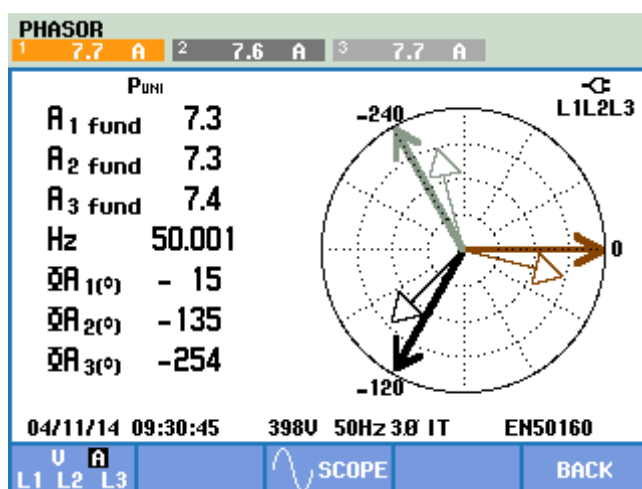
Sillan syöttöjännite säädettiin 400 V:iin ja ohjauskulmaksi säädettiin  $18^\circ$ . Tarvitavat mittaukset otettiin ylös. Kuvasta 55 nähdään suuntaajan verkosta ottama näennäis- ja pätöteho sekä tehokerroin.





KUVA 55. Verkosta otetut tehot kun  $\alpha = 18^\circ$

Kuvasta 55 voidaan todeta, että suuntaajan tehokerroin on hyvä, 0,92, tällä ohjauskulmalla. Tämä sopii yhteen laitteen periaatteellisen toiminnan kanssa. Kuvan 56 vektoridiagrammista nähdään virran ja jännitteen välinen kulmaero.

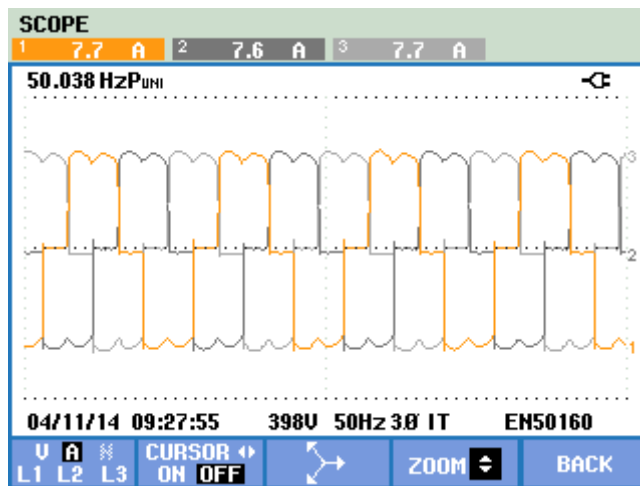


KUVA 56. Vektoridiagrammi kun  $\alpha = 18^\circ$

Koska diagrammin positiivinen kiertosuunta on vastapäivään, voidaan todeta virran osoittimien olevan jäljessä vastaavaa jännitteen osoitinta. Kulmaero on yhtä suuri kuin luonnollisen kommutointihetken ja varsinaisen sytytyshetken vaihe-ero, ts. ohjauskulman suuruus – kuten aiemmin on todettu.

Kuvassa 57 on esitetty suuntaajan verkosta ottaman virran aaltomuoto.



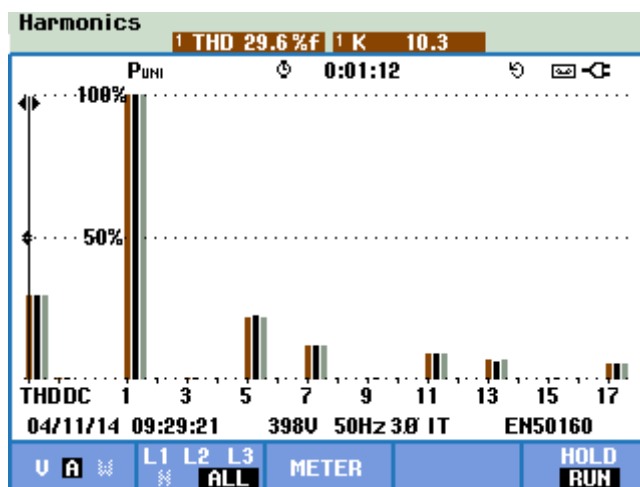


KUVA 57. Verkkovirran aaltomuoto

Kuvasta 57 voidaan todeta, että suuntaajan verkosta ottama virta on hyvin voimakkaasti palkittunutta, mikä on tavanomaista tyristorikäyttöille. Kuvasta voidaan todeta myös kunkin vaiheen johtavan vuorolla 120 verkkoastetta ja samassa ajassa tapahtuu kaksi vastakkaisen vaiheen kommutointia.

Virran kuvaaja ei käsitellä enää tämän työn muissa vaiheissa, sillä se on kaikissa tapauksissa aaltomuodoltaan hyvin samankaltainen.

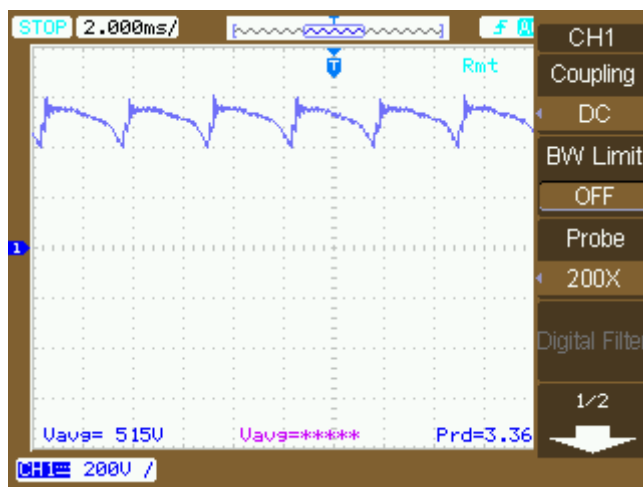
Virran palkittumisen seurauksena sen yliaaltosisältö on hyvin suuri. Tämä käy ilmi kuvan 58 yliaaltospektristä.



KUVA 58. Verkkovirran yliaaltospektri

Kuvasta 58 käy hyvin ilmi kuusipulssikäytölle tavanomainen virran yliaaltosisältö. 5. ja 7. yliaalto ovat suhteessa hyvin voimakkaita, kuten tämän työn luvun 3.4 taulukossa 3 on aiemmin osoitettu. Yliaaltojen prosentuaaliset jakaumat vastaavat teoreettisia arvoja. Yliaaltospektriä ei käydä läpi enää tämän työn muissa kohdissa, sillä se pysyy käyttötyypistä riippumatta vakiona.

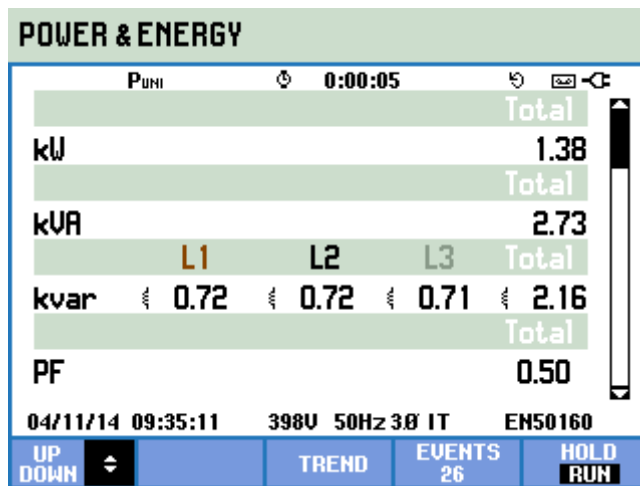
Kuvassa 59 on suuntaajan välipiirin DC -jännite, josta käy hyvin ilmi kuusipulssisillalle ominainen aaltomuoto. Jännitteen keskiarvo on 515 V



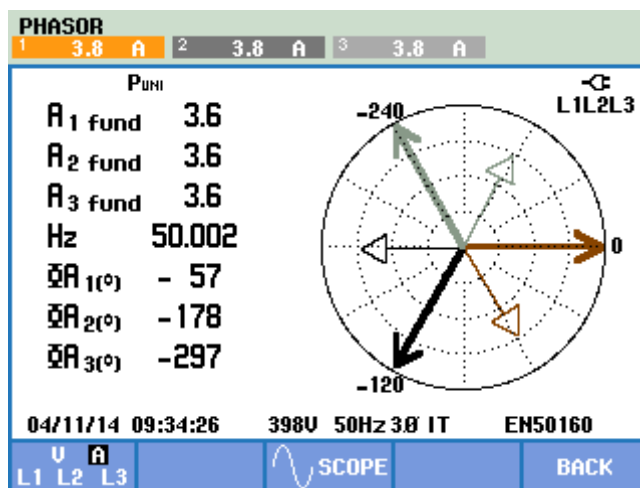
KUVA 59. DC-jännite kun  $\alpha = 18^\circ$

### 11.1.2 Ohjauskulma $60^\circ$

Mittaukset toistettiin ohjauskulman arvolla  $60^\circ$ . Kuvista 60 ja 61 käy ilmi, että ohjauskulma vastaa suoraan verkkovirran ja -jännitteen välistä vaihe-eroa; Kun ohjauskulmaa viivästetään, käytön tehokerroin laskee.



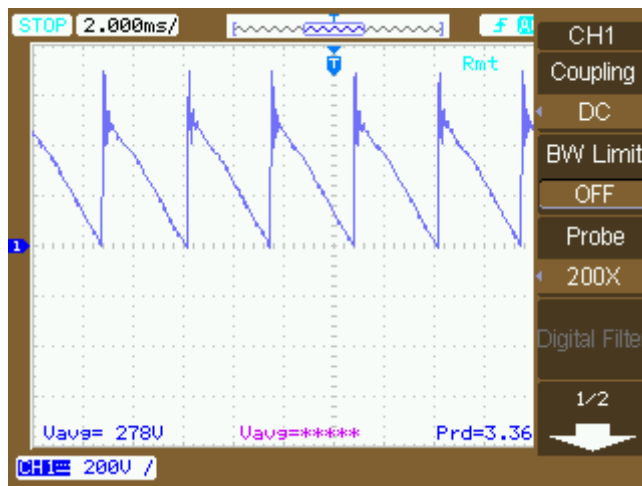
KUVA 60. Verkosta otettu teho kun  $\alpha = 60^\circ$



KUVA 61. Vektoridiagrammi kun  $\alpha = 60^\circ$

Kuvasta 61 nähdään selvästi, että ohjauskulman ollessa 60 astetta, on myös vaihejännitteen ja vaihevirran välinen erokulma  $60^\circ$ . Täten käytön tehokertoimeksi tulee 0.5, kuten kuvasta 60 käy ilmi.

Kuvasta 62 käy ilmi kuinka ohjauskulman viivästyttäminen vaikuttaa välipiirin jännitteeseen. Viivästyneellä ohjauksella välipiirin jännite on voimakkaasti sahalaitainen. Jännitteen aaltomuodon integraali on pienempi ja siten myös DC-jännite matalampi. Seurauksena myös kuormitukselle syötetty teho pienenee.

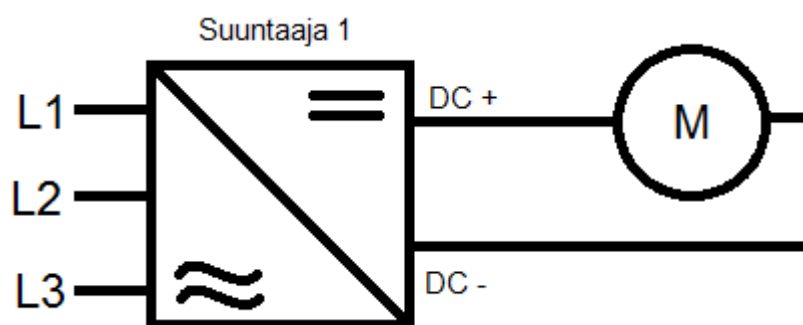


KUVA 62. DC-jännite kun  $\alpha = 60^\circ$

Tulosten perusteella voidaan todeta laitteiston toimivan odotetulla tavalla tasasuuntauskäytössä käytettäessä resistiivistä kuormitusta.

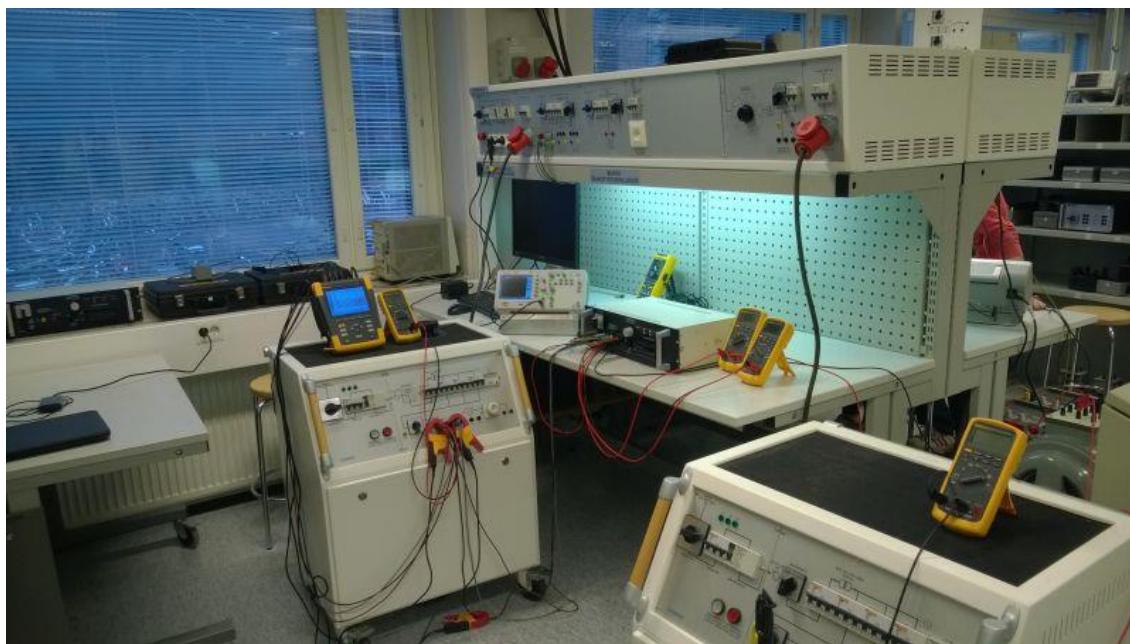
## 11.2 Moottorikäyttö

Moottorikäytön koestukseen käytettiin 1.5 kW vierasmagnetoitua DC-moottoria. Tarvittava magnetointiteho tuotettiin erillisellä virtavaunulla, jonka kytkentää ei kuitenkaan käydä tässä läpi, sillä se ei ole tämän tarkastelun kannalta oleellinen tekijä. Kokeissa olivat mukana myös edellisessä kohdassa olleet virta- ja jännitemittaukset, joita ei myöskään käydä läpi samasta syystä. Moottoria kuormitettiin ulkoisella servomoottorilla nimellisellä 8 Nm momentilla. Työn periaatekytkentä on kuvassa 63.



KUVA 63. Moottorityön periaatekuva

Kuvasta 63 voidaan huomata, että kytkennässä ei ole enää mukana tasasuuntaustyössä käytettyä sarjakuristinta. Kuristinta ei tarvita, sillä moottorin ankkurikäämitys on itsessään hyvin suuri induktanssi ja riittää siten tasoittamaan DC-virran aaltoisuuden. Koejärjestely on kuvassa 64 ja käytetty moottorilaitteisto kuvassa 65.



KUVA 64. Koejärjestely

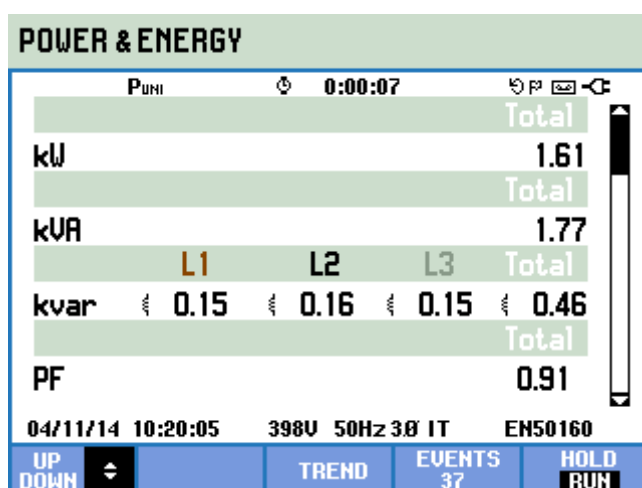


KUVA 65. Käytetty moottori ja jarruservo

### 11.2.1 Ohjauskulma 18°

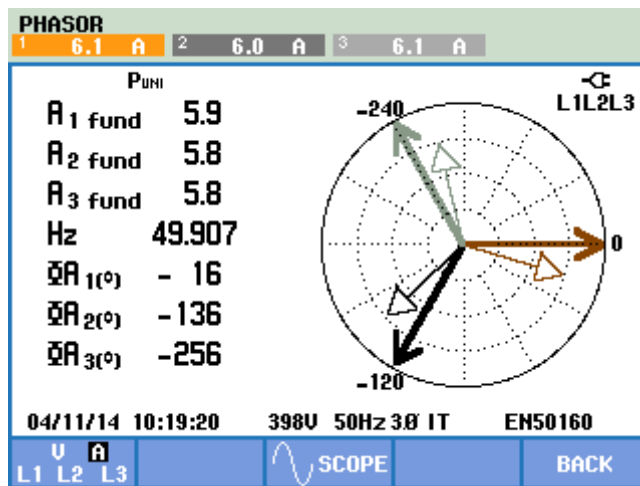
Koska moottorin nimellinen käyttöjännite on 230 V DC, syötettiin tyristorisuuntaajaan alennettu 170 V pääjännite. Näin voitiin varmistua siitä, että ohjauskulmaa ei voitaisi epähuomiossa nostaa liian suureksi ja täten vahingoittaa moottoria.

Ohjauskulma säädettiin arvoon 18° kuormituksen ollessa kytkettynä moottorin akselille ja toistettiin kohdan 11.1 mittaukset. Kuvassa 66 nähdään suuntaajan verkosta ottama teho, näennäisteho ja tehokerroin.



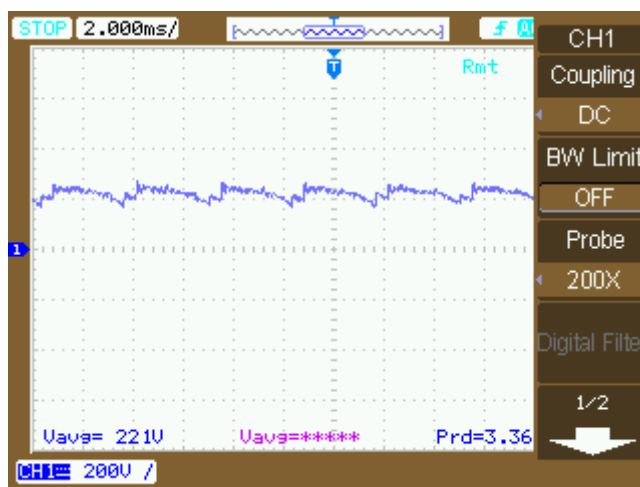
KUVA 66. Verkosta otettu teho kun  $\alpha = 18^\circ$

Kuvasta 66 voidaan todeta käytön tehokertoimen olevan hyvä puhtaassa tasasuuntauksessa. Tilanne vastaa kohdan 11.1.1 tapausta. Myös kuva 67 tukee tätä, osoittaen virran vaihe-erokulman olevan vähäinen.



KUVA 67. Vektoridiagrammi kun  $\alpha = 18^\circ$

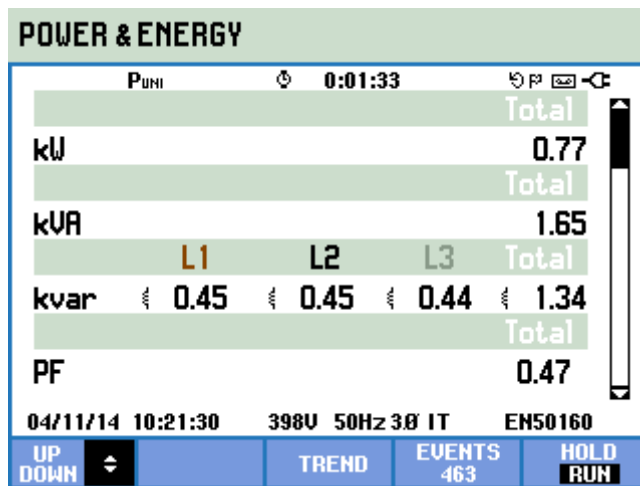
Välipiirin jännite on esitettyä kuvassa 68. Voidaan todeta sen olevan tasoittuneempaa kuin edellisessä kohdassa. Tämä johtuu moottorikuormituksen suuremmasta induktanssista aiempaan kuristimeen verrattuna.



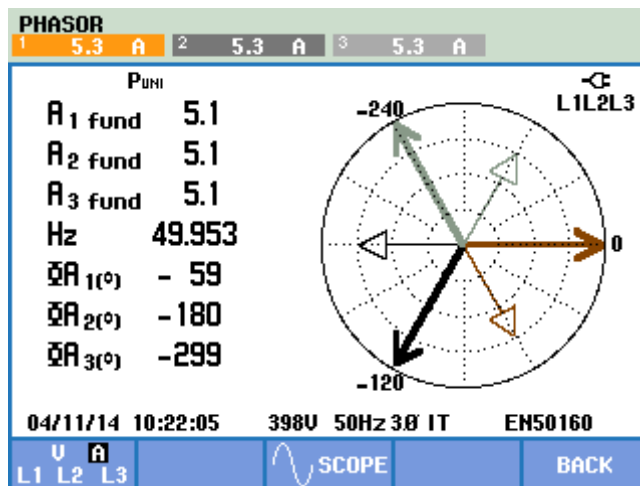
KUVA 68. DC-jännite kun  $\alpha = 18^\circ$

### 11.2.2 Ohjauskulma $60^\circ$

Mittaukset toistettiin myös ohjauskulmalla  $60^\circ$ . Kuvassa 69 on suuntaajan verkosta ottama teho tässä käyttötilanteessa. Tämän ja kuvan 70 vektoridiagrammin perusteella voidaan todeta suuntaajan ottaman loistehon käyttäytyvän odotetulla tavalla ohjauskulman suhteen.



KUVA 69. Verkosta otettu teho kun  $\alpha = 60^\circ$

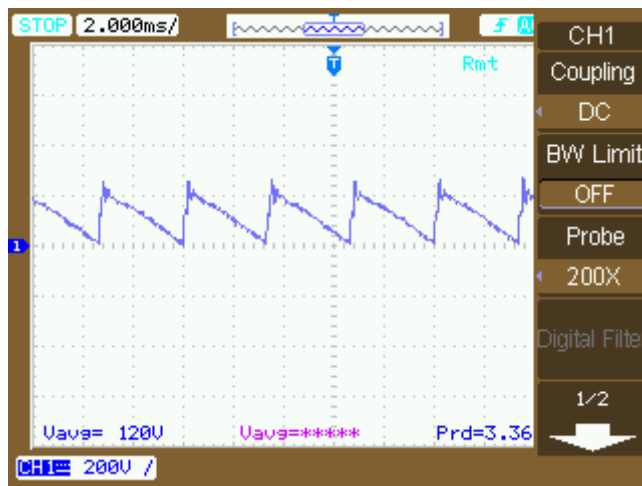


KUVA 70. Vektoridiagrammi kun  $\alpha = 60^\circ$

Voidaan todeta suuntaajan tehokertoimen laskevan ja virran vaihe-erokulman nousevan ohjauskulman kasvaessa. Tulokset ovat verrattavissa puhtaasti resis-  
tiivisen kuormituksen tapauksessa saatuihin tuloksiin.

Välipiirin jännite on kuvassa 71. Voidaan todeta sen aaltoisuuden kasvavan oh-  
jauskulman mukana.



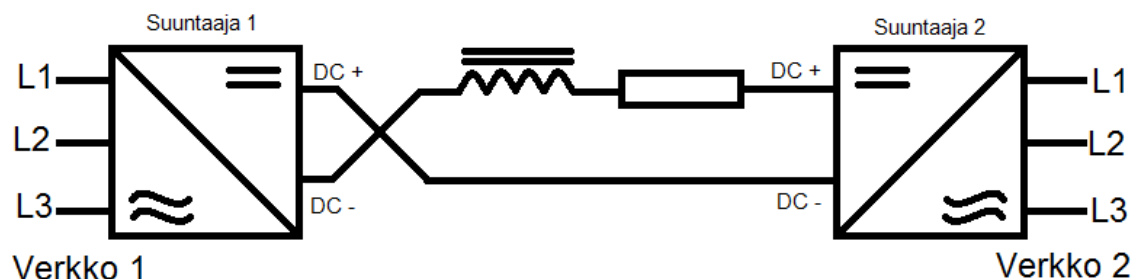


KUVA 71. DC-jännite kun  $\alpha = 60^\circ$

Tulosten perusteella voidaan todeta laitteiston toimivan odotetulla tavalla tasasuuntauskäytössä myös käytettäessä moottorikuormitusta.

### 11.3 Tasa- vaihtosuuntaustyö

Vaihtosuuntaustyö koestettiin viimeiseksi. Työssä yksi suuntaaja toimii tasasuuntaajana, joka syöttää tehoa sähköverkosta DC-välipiiriin. Toinen suuntaaja toimii vaihtosuuntaajana, joka syöttää tehoa DC-välipiiristä sähköverkkoon. Tehon suunta ja määrä voidaan asettaa vapaasti suuntaajien ohjauskulmaa muuttamalla. Työn periaatekytkentä on kuvassa 72.



KUVA 72. Vaihtosuuntauksen periaatekytkentä.

Välipiirin kuristimen tehtävänä on tasoittaa välipiirin virtaa ja sarjavastus simuloi pitkän DC-kaapelin resistanssia. Vastus myös rajoittaa vikavirran määrää tilan-

teessa, jossa käyttäjän virheen takia suuntaajien ohjauskulmat säädetään liian lähelle toisiaan. Kuten aiemmissa kohdissa, koekytettä lisättiin myös DC-piirin virtamittaus, jännitemittaus ja vaihejännitteen mittaus, joita ei käsitellä tässä yhteydessä. Koejärjestely on kuvassa 73.



KUVA 73. Koejärjestely

Työssä käytettiin kahta säätövaunua, joiden jännitetasot säädettiin yhtäsuuriksi 200 V:iin. Suuntaajia koestettiin useilla eri ohjauskulma-alueilla, joista seuraavaksi käydään läpi kolme.

On tärkeää huomata, että suuntaajan 1 verkkoon syöttämä teho ei ole sama kuin suuntaajan 2 verkosta ottama teho. Tämä johtuu siitä, että suuntaajien välipiirissä olevassa  $10\ \Omega$  vastuksessa tapahtuu häviöitä, jotka määräytyvät neliöllisesti välipiirin virran suhteen. Lisäksi häviöitä tapahtuu luonnollisesti itse tyristoryoreissa ja niiden RC-suojissa, joskin nämä ovat vähäisiä itse DC-piirin resistanssin aiheuttamiin häviöihin verrattuna. Siten suuntaajan 1 verkkoon syöttämä teho voidaan laskea kaavan 12 mukaisesti.

$$P_{\text{suunt1}} = P_{\text{suunt2}} - P_h \quad (12)$$

Jossa,

$P_{\text{suunt1}}$  on suuntaajan 1 verkkoon 1 syöttämä teho

$P_{\text{suunt2}}$  on suuntaajan 2 verkosta 2 ottama teho

$P_h$  on DC-välipiirissä ja suuntaajissa tapahtuva häviöteho

Koska DC-välipiirin häviö on niin suuri suuntaajien häviöihin verrattuna, voidaan kaava 12 yleistää kaavan 13 muotoon seuraavasti:

$$P_{\text{vaihto}} = P_{\text{tasa}} - I_{\text{DC}}^2 \cdot R_{\text{DC}} \quad (13)$$

Jossa,

$P_{\text{vaihto}}$  on vaihtosuuntaajan verkkoon syöttämä teho

$P_{\text{tasa}}$  on tasasuuntaajan verkosta ottama teho

$I_{\text{DC}}$  on DC-välipiirin virta

$R_{\text{DC}}$  on DC-välipiirin DC-resistanssi

Yllä esitetyt kaavat toimivat samalla tavalla riippumatta tehon suunnasta.

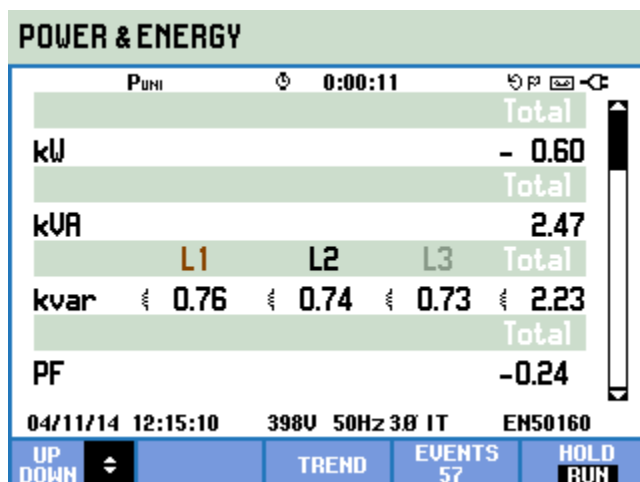
### 11.3.1 Ohjauskulma 110 / 60°

Suuntaajien syöttöjännitteet ja ohjauskulmat aseteltiin taulukon 6 mukaisiin arvoihin. Mittauksissa tarkasteltiin suuntaajan 1 verkkosuureita.

TAULUKKO 6. Lähtöarvot

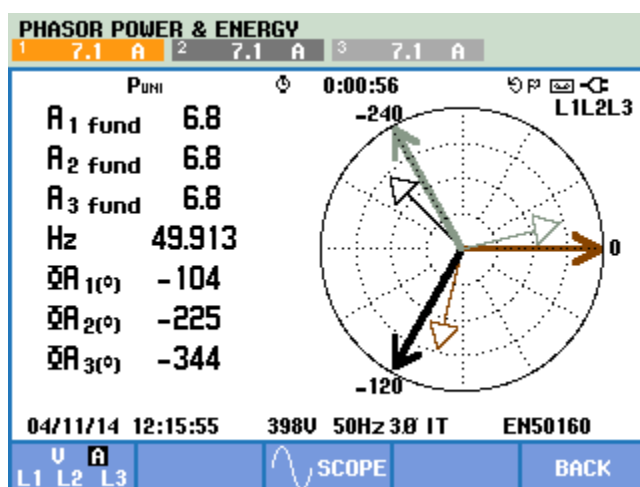
		Arvo	Suure
Suuntaaja 1	Pääjännite	200	V
	Ohjauskulma	110	°
Suuntaaja 2	Pääjännite	200	V
	Ohjauskulma	60	°

Taulukon 6 arvojen perusteella suuntaaja 1 on vaihtosuuntauskäytössä ja suuntaaja 2 tasasuuntauskäytössä. Suuntaajan 1 verkkoon syöttämä teho nähdään kuvassa 74.



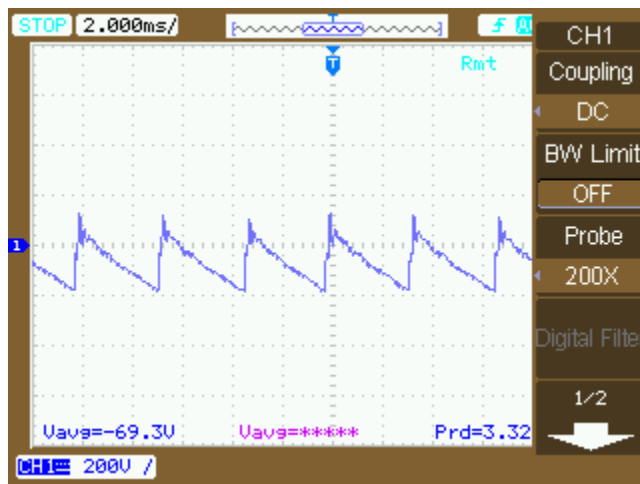
KUVA 74. Suuntaajan 1 verkkoon syöttämä teho kun  $\alpha = 110^\circ$

Kuvasta 74. käy ilmi, että suuntaajan tehokerroin on tällä ohjauskulma-alueella erittäin huono, tehokertoimen ollessa vain 0,24; 0,6 kW pätötehoa vastaa tässä 2,2 kVAR loisteho ja 2,5 kVA näennäisteho. Sama käy ilmi kuvan 75 vektoridiagrammista, josta voidaan todeta virran olevan suuri, mutta sen välittämän tehon olevan vähäinen.



KUVA 75. Suuntaajan 1 vektoridiagrammi kun  $\alpha = 110^\circ$

Kuva 76 esittää suuntaajan välipiirijännitettä. Erona aiemmin käsiteltyihin tapauksiin on se, että suuntaaja on vaihtosuuntauskäytössä, joten sen navoista mitattu välipiirijännite on negatiivinen.



KUVA 76. Suuntaajan 1 välipiirijännite kun  $\alpha = 110^\circ$

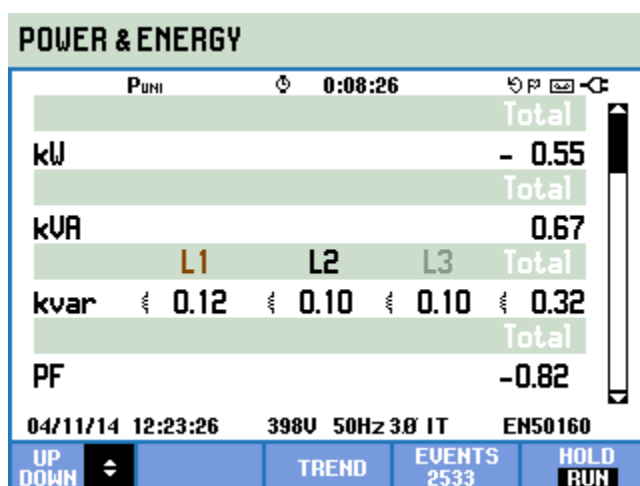
### 11.3.2 Ohjauskulma 160 / 18°

Suuntaajien syöttöjännitteet ja ohjauskulmat aseteltiin taulukon 7 mukaisiin arvoihin, jonka jälkeen suoritettiin mittaukset.

TAULUKKO 7. Lähtöarvot

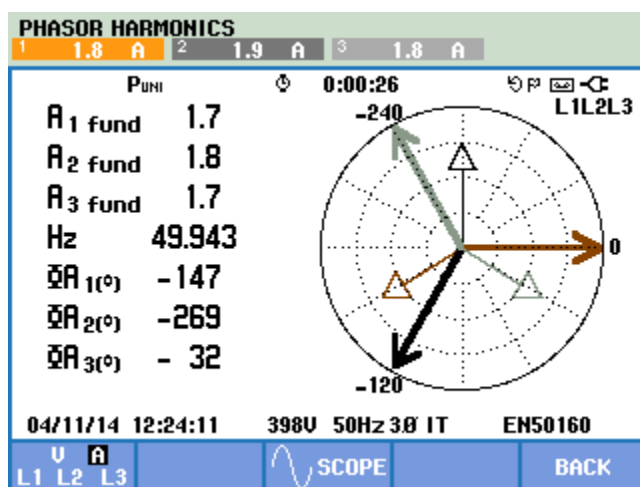
		Arvo	Suure
Suuntaaja 1	Pääjännite	200	V
	Ohjauskulma	160	°
Suuntaaja 2	Pääjännite	200	V
	Ohjauskulma	18	°

Taulukon 7 arvojen perusteella suuntaaja 1 on puhtaassa vaihtosuuntauskäytössä ja suuntaaja 2 puhtaassa tasasuuntauskäytössä. Kuvasta 77 voidaan todeta, että käytön tehokerroin on nyt huomattavasti parempi.



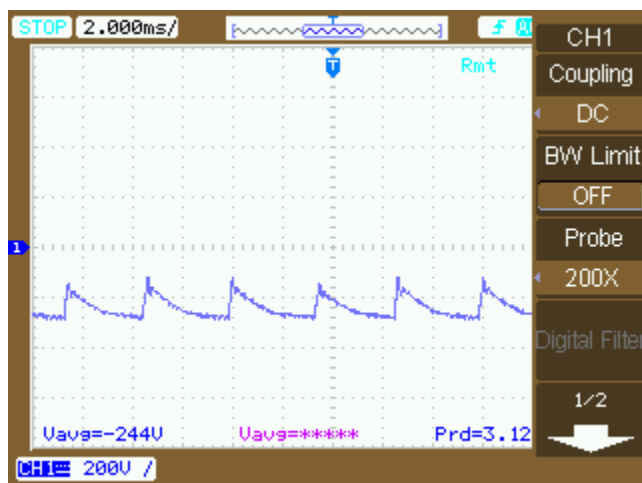
KUVA 77. Suuntaajan 1 verkkoon syöttämä teho kun  $\alpha = 160^\circ$

Kuvan 78 vektoridiagrammista voidaan jälleen todeta, että positiivisen kierto-suunnan ollessa vastapäivään, on vaihevirran osoitin jäljessä vaihejännitteen osoitinta ohjauskulmaa vastaavalla viiveellä.



KUVA 78. Suuntaajan 1 vektoridiagrammi kun  $\alpha = 160^\circ$

Kuvasta 79 käy ilmi, että suuntaajan välipiirijännite saavuttaa suurimman negatiivisen arvonsa odotetusti ohjauskulman ollessa maksimissaan. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta käytön toimivan luvun 3.4 kuvan 9 ennustamalla tavalla.



KUVA 79. Suuntaajan 1 välipiirijännite kun  $\alpha = 160^\circ$

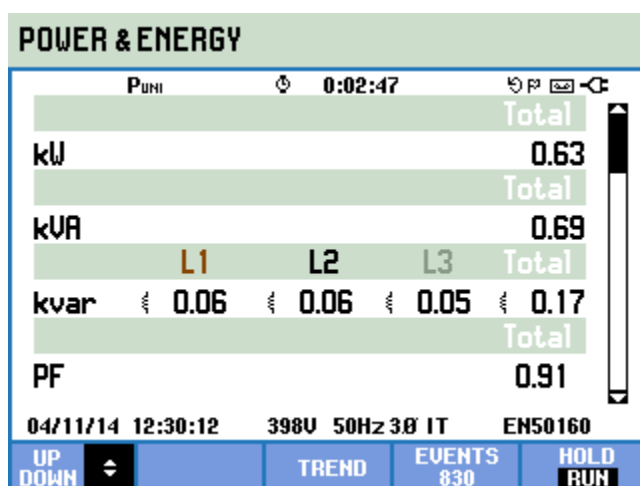
### 11.3.3 Ohjauskulma 18 / $160^\circ$

Suuntaajien syöttöjännitteet ja ohjauskulmat aseteltiin taulukon 8 mukaisiin arvoihin, jonka jälkeen suoritettiin mittaukset. Mittauksissa tarkasteltiin edelleen suuntaajan 1 verkkosuureita.

TAULUKKO 8. Lähtöarvot

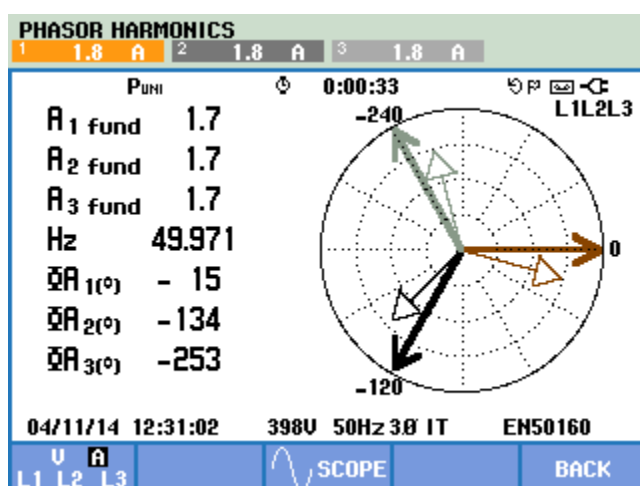
		Arvo	Suure
Suuntaaja 1	Pääjännite	200	V
	Ohjauskulma	18	°
Suuntaaja 2	Pääjännite	200	V
	Ohjauskulma	160	°

Tehon suunta käännettiin asettelemalla suuntaajan 1 ohjauskulma arvoon  $18^\circ$  ja suuntaajan 2 arvoon  $160^\circ$ . Tällöin suuntaaja 1 toimii tasasuuntaajana ja suuntaaja 2 vaihtosuuntaajana. Asetelma on siis tarkalleen ottaen päinvastainen edelliseen kohtaan verrattuna ja siten myös tuloksien tulisi olla peilikuvia toisistaan. Kuva 80 esittää suuntaajan 1 tehoa tässä uudessa käyttötilanteessa.



KUVA 80. Suuntaajan 1 verkosta ottama teho kun  $\alpha = 18^\circ$

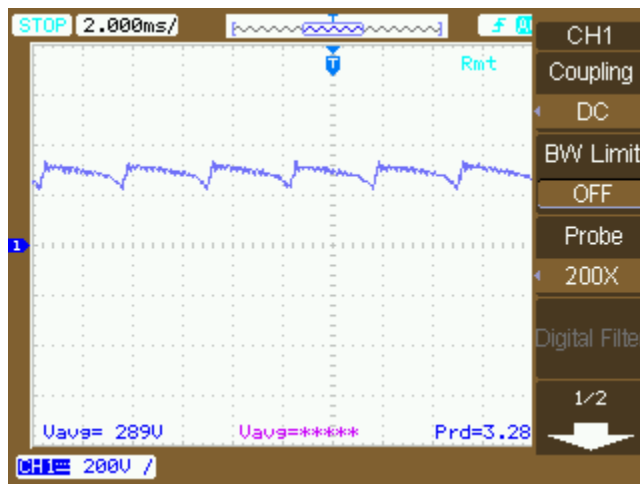
Kuvaa 80 ja 77 vertaamalla voidaan todeta, että vaikka tilanteen pitäisikin olla symmetrinen, eivät verkosta otettu ja verkkoon syötetty teho vastaa täysin toisiinsa. Myös tehokertoimessa on eroa. Tämä johtuu DC-välipiirissä aiheutuvista häviöistä, jotka voidaan laskea kaavan 13 mukaisesti. Koska tehomittaus on nyt DC-välipiiriin tehoa syöttävällä puolella, näkyvät siinä toisella puolella verkkoon syötetyn tehon lisäksi myös välipiiriin häviöt. Tämä aiheuttaa luonnollisesti eroa mittauksien välillä, vaikka laitteistot toimivatkin identtisesti. Verkkovirran vektoridiagrammi on kuvassa 81.



KUVA 81. Suuntaajan 1 vektoridiagrammi kun  $\alpha = 18^\circ$



Kuvan 82 oskilloskooppikaappauksesta voidaan todeta suuntaajan välipiirijännitteen kääntyneen jälleen positiiviseksi, sillä suuntaaja on tasasuuntauskäytössä.



KUVA 82. Suuntaajan 1 välipiirijännite kun  $\alpha = 18^\circ$

Voidaan todeta laitteiden toimivan tässä käyttötilanteessa kohtaa 11.3.2 vastaavalla tavalla – vain tehon suunta on kääntynyt.

Yhteenvedona voidaan todeta, että luvun 11 kokeiden tulosten perusteella voidaan todeta laitteiston toimivan odotetulla tavalla kaikissa oleellisissa käyttötilanteissa.

## 12 SFS-EN 61010-1:2011 MUKAINEN KOESTUS

Käyttökokeiden jälkeen laitteistot koestettiin laboratoriolaitestandardin SFS-EN 61010-1:2011 mukaisesti soveltuvien osien. Koestuksessa käytettiin Gossen Secutest III testeriä. Laitteistoista koestettiin sähköverkkoon liittyvistä osista:

- Suojajohtimen jatkuvuus
- Eristysvastus
- Vuotovirta normaalitilanteessa
- Vuotovirta yhden vian tapauksessa

Lisäksi tehtiin luonnollisesti myös aistinvarainen tarkastus, mutta ylijännitekoestus jätettiin tekemättä elektroniikan vaurioitumisriskin vuoksi. Mitatut suureet olivat sallittujen rajojen sisällä. Testerin antamat tulokset ovat kuvassa 83. Koestuksien pohjalta laaditut pöytäkirjat ovat liitteissä 3 ja 4.

13.11.14	10:44	13.11.14	11:05
PIRANK OY TAMK Sähkötyöpaja 1 Kuntokatu 3 33520 Tampere		PIRANK OY TAMK Sähkötyöpaja 1 Kuntokatu 3 33520 Tampere	
Item: TS 2 Manufacturer: S Rapo Type: TS 2 Ident number: 002		Item: TS 1 Manufacturer: S Rapo Type: TS 1 Ident number: 001	
Repair: Tarkastusmittaus		Repair: Tarkastusmittaus	
Test item: on test socket CL I		Test item: on test socket CL I	
	Meas. values Limits		Meas. values Limits
RPE	0.064Ω <0.100Ω	RPE	0.057Ω <0.100Ω
RINS	>310.0VΩ >0.500MΩ	RINS	>310.0VΩ >0.500MΩ
UINS	0521V 0500V	UINS	0521V 0500V
ULN	233.5V 253.0V	ULN	233.2V 253.0V
IHLNC	000.2pA <0.500mA	IHLNC	000.0pA <0.500mA
IHLSF	000.2pA <0.500mA	IHLSF	000.0pA <0.500mA
EN 61010 passed		EN 61010 passed	
Visual inspection Passed		Visual inspection Passed	
Tarkastusmittaus		Tarkastusmittaus	
Visual inspection Passed		Visual inspection Passed	
Tarkastusmittaus		Tarkastusmittaus	

KUVA 83. Koestuksen tulokset

## 13 POHDINTA

Työtä lähdettiin toteuttamaan hieman sokkona, ts. ilman syvempää tuntemusta tyristorisiltojen toiminnasta. Ohjauspiirin valinnan jälkeen alettiin suunnitella erilaisia prototyyppejä, joiden toiminnan tai toimimattomuuden pohjalta voitiin aina ottaa askel eteenpäin kohti valmista laitteistoa. Täten projektiin sisältyi runsaasti itseoppimista ja erilaisia käytännöllisiä osa-alueita, varsinaisen teoriaosuuden jäädessä tyristorisuuntaajien perusominaisuuksien tasolle. Työssä käytettiin systemaattista ajattelua, jossa prototyyppien pohjalta luotiin pienempiä osakokonaisuuksia, jotka voitiin myöhemmin sijoittaa suoraan seuraavan prototyypin ja lopulta tuotantoversion kytkentöihin.

Projektin aikana pidettiin kirjaa aikatauluista, komponenttihankinnoista ja toimituksista, opiskeltiin työhön liittyvää tekniikkaa, luotiin simulaatiomalleja ja opeteltiin uusien (EDA) työkalujen, kuten Altium Designerin, käyttöä. Työn yhteydessä todettiin työnaikaisen dokumentoinnin tärkeys myöhempien työvaiheiden ja ongelmien selvityksen yhteydessä. Lisäksi havaittiin aikataulutuksen tärkeys komponenttitilauksien saapumisen ja projektin eri työvaiheiden toteutumisen varmistamiseksi halutussa aikataulussa.

Edellä mainittujen, jokseenkin hallinnollisten, näkökohtien lisäksi työssä nousivat erityisesti esille voimakkaasti elektroniikkasuunnittelun DFM-näkökohdat. DFM, *Design for Manufacture*, tarkoittaa suunniteltavan tuotteen sarjatuotantoon liittyviä näkökohtia. Tällä tarkoitetaan paitsi kokoonpanon helppoutta ja laadukkaan tuotantodokumentaation luontia, myös komponenttien saatavuutta ja komponenttivalintojen optimointia teknis-taloudellisia näkökulmia silmällä pitäen. Jo näinkin pienessä tuotantosarjassa nousi esille se, että valittuja komponentteja ei välttämättä ole saatavilla suurienkaan toimittajien varastoista niissä määrin, kuin vaaditaan. Tämä nousi erityisesti esille pulssimuuntajien tapauksessa, joiden valintaa jouduttiin muuttamaan useita kertoja, ennen kuin käytötarkoitukseen soveltuvia ja sopivan hintaisia muuntajia löytyi hankittavaksi riittävä määrä. Arvatenkin, tehtäessä vielä suurempia, tuhansien tai miljoonien – tai vaikka nyt kymmenien – kappaleiden eriä, olisivat nämä kysymykset huomattavasti suuremmassa osassa.

Teknisessä toteutuksessa todettiin, että vaikka valittu ajuripiiri – TCA785 – on soveltuva tähän tehtävään, ei se kuitenkaan ole optimaalinen valinta. Kolmivaiheisen sytytysyksikön kytkennän toteuttaminen vaati merkittävästi enemmän virittämistä kuin pelkän yksivaiheisen prototyypin pohjalta olisi voinut olettaa. Piiri soveltuu paremmin yksivaiheisiin tasasuuntauskäyttöihin ja 1- tai 3-vaiheisiin vaihesäätimiin, joihin se on toisaalta tarkoitettukin. Myös piirien suhteellisen korkea hinta ja mahdollisesti epävarma saatavuus tulevaisuudessa puoltavat jonkin toisen ratkaisun käyttämistä tässä työssä käsiteltyihin sovelluksiin.

Yhden miehen projektiksi työ oli laajuudeltaan haastava ja teknisesti vaativa, mutta loppujen lopuksi kuitenkin saatiin valmiiksi toimivat ja halutunkaltaiset laitteistot. Työhön upotetun tuotekehityksen pohjalta voitaisiin hyvinkin lähteä kehittämään vielä parempia ratkaisuja.

## LÄHTEET

ABB. Design of Snubbers for Phase Control Apps, 2001. Luettu 23.5.2014.  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/27552f27f7688d5cc12573e90032b2cb/\\$file/Design%20of%20RC%20snubbers%20for%20PCT\\_5S\\_YA%202020-02NewLay.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/27552f27f7688d5cc12573e90032b2cb/$file/Design%20of%20RC%20snubbers%20for%20PCT_5S_YA%202020-02NewLay.pdf)

AEG-TELEFUNKEN. Thyristoren, Triacs. 1977, 229.

Conner, S. Tesla Four - Thyristor Power Supply, 2003. Luettu 23.5.2014.  
<http://scopeboy.com/tesla/ol2psu.html>

Ignatius H. Sähkölaboraatiot II, 1981.

Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Julkaisu 12 - 71, Teollisuuden tyristorikäytöt. 1971.

Kretzmann, Industrial Electronics, 1953

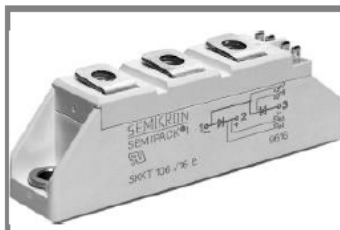
Paavola, Lehtinen. Sähkötekniikan oppikirja, 1984.

Uotila, R. Diplomityö, Hissikäytön tyristorisillan palautuva ylivirtasuojaus vaihtosuuntauksen aikana, 27.3.1971.

## LIITTEET

## Liite 1. Semikron SKKT57/16E tyristorimoduulin datalehti. (Semikron, 2011)

## SKKT 57, SKKH 57, SKKT 57B



## SEMIPACK® 1

## Thyristor / Diode Modules

SKKT 57

SKKH 57

SKKT 57B

## Features

- Heat transfer through aluminium oxide ceramic isolated metal baseplate
- Hard soldered joints for high reliability
- UL recognized, file no. E 63 532

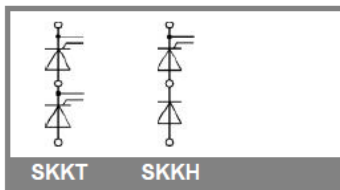
## Typical Applications\*

- DC motor control (e. g. for machine tools)
- AC motor soft starters
- Temperature control (e. g. for ovens, chemical processes)
- Professional light dimming (studios, theaters)

1) See the assembly instructions

$V_{RSM}$ V	$V_{RRM}, V_{DRM}$ V	$I_{TRMS} = 95$ A (maximum value for continuous operation) $I_{TAV} = 55$ A (sin. 180; $T_c = 80$ °C)		
900	800	SKKT 57/08E	SKKT 57B08E	SKKH 57/08E
1300	1200	SKKT 57/12E	SKKT 57B12E	SKKH 57/12E
1500	1400	SKKT 57/14E	SKKT 57B14E	SKKH 57/14E
1700	1600	SKKT 57/16E	SKKT 57B16E	SKKH 57/16E
1900	1800	SKKT 57/18E	SKKT 57B18E	SKKH 57/18E

Symbol	Conditions	Values	Units
$I_{TAV}$	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	50 (35)	A
$I_D$	P3/180; $T_a = 45$ °C; B2 / B6	57 / 68	A
	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	100 / 130	A
$I_{RMS}$	P3/180F; $T_a = 35$ °C; W1 / W3	130 / 3 x 100	A
$I_{TSM}$	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	1500	A
	$T_{vj} = 125$ °C; 10 ms	1250	A
$i^2t$	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	11000	A²s
	$T_{vj} = 125$ °C; 8,3 ... 10 ms	8000	A²s
$V_T$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 200$ A	max. 1,65	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 0,9	V
$r_T$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 3,5	mΩ
$I_{DD}, I_{RD}$	$T_{vj} = 125$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}; V_{DD} = V_{DRM}$	max. 15	mA
$t_{gd}$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
$t_{gr}$	$V_D = 0,67 \cdot V_{DRM}$	2	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 150	A/μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 1000	V/μs
$t_q$	$T_{vj} = 125$ °C	80	μs
$I_H$	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 250	mA
$I_L$	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 600	mA
$V_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
$I_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 150	mA
$V_{GD}$	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 0,25	V
$I_{GD}$	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 6	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,57 / 0,29	K/W
$R_{th(j-c)}$	sin. 180; per thyristor / per module	0,6 / 0,3	K/W
$R_{th(j-c)}$	rec. 120; per thyristor / per module	0,64 / 0,32	K/W
$R_{th(c-s)}$	per thyristor / per module	0,2 / 0,1	K/W
$T_{vj}$		- 40 ... + 125	°C
$T_{stg}$		- 40 ... + 125	°C
$V_{sol}$	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
$M_s$	to heatsink	5 ± 15 % <sup>1)</sup>	Nm
$M_t$	to terminals	3 ± 15 %	Nm
$a$		5 * 9,81	m/s²
$m$	approx.	95	g
Case	SKKT	A 46	
	SKKT ...B	A 48	
	SKKH	A 47	



**Liite 2. Muuntajien kytkentäryhmät** (Hannes Ignatius, Sähkölaboraatiot II 1981, 9)

MERKINTÄ		OSOITINDIAGRAMMA		KYTKENTÄ		MUUNTO-SUHDE
TUNNUS-LUKU	KYTKENTÄ-RYHMÄ	ENSIO	TOISIO	ENSIO	TOISIO	$U_1:U_2$
0	Dd0					$\frac{N_1}{N_2}$
0	Yy0					$\frac{N_1}{N_2}$
0	Dz0					$\frac{2N_1}{3N_2}$
5	Uy5					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
5	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$
5	Yz5					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$
6	Dd6					$\frac{N_1}{N_2}$
6	Yy6					$\frac{N_1}{N_2}$
6	Dz6					$\frac{2N_1}{3N_2}$
11	Dy11					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
11	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$
11	Yz11					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$

## Liite 3. Tarkastuspöytäkirja, suuntaaja 1



Pirkanmaan ammattikorkeakoulu Oy  
Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakentaminen ja teknologia  
Laitedokumentti  
Sähkötyöpaja 1/Kuntokatu 3



<input type="checkbox"/> Korjatun laitteet testaaminen		<input checked="" type="checkbox"/> Uuden rakennetun laitteen testaaminen	
Laite 13112014-1		Suojaluokka <input checked="" type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III	
Mallimerkintä Tyristorisuuntaaja "Luna"		Valmistaja SRa	
Nimellisjännite 400 V	Teho 6900 W	Valmistusvuosi 2014	
Jätetty	Korjattu/nimikirj.	Noudettu	
Vastuualue			
Tilaajan nimi		Puhelin	
Vikaselostus			
Työtilaus			
Myöhemmin sovitut työt			
Suoritetut työt Aistinvarainen tarkastus ja tarkastusmittaus laitteille 13112014 / 001.			
Tarkastus SFS-EN 61010-1:2011 mukaan soveltuvin osin.			
Korjausten jälkeiset tarkastukset (SFS-EN 60335-1:2009/ST 6 Sähkölaitekorjaajan opas): Aistinvaraisen tarkastuksen perusteella ovat kunnossa			
<input checked="" type="checkbox"/> Eristykset		<input checked="" type="checkbox"/> Kotelointi	<input type="checkbox"/> Liitäntäkaapeli
<input type="checkbox"/> Suojajohdin			
Huomautuksia Laite ei sisällä kiinteitä liitäntäkaapeleita.			
Suojajohdinpiirin vastus		Vaadittu 0,100 Ω	Mitattu 0,057 Ω
Eristysresistanssi		0,5 MΩ	>310 MΩ
Vuotovirta		0,00002 mA	<0,5 mA
Jännitekoe		kV	kV
Toimintakoe: <input checked="" type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Puutteellinen		Merkinnät: <input checked="" type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Puutteelliset	
Käytetty mittalaite Securest SIII		Mittalaitteen kalibrointipäivä 17.7.2013	
Huomautuksia Ylijännitekoetta ei suoritettu elektroniikan vuoksi.			
Kokeet suoritettiin 13.11.2014 MKo			
Päiväys		Tilaajan allekirjoitus	



## Liite 4. Tarkastuspöytäkirja, suuntaaja 2



Pirkanmaan ammattikorkeakoulu Oy  
Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakentaminen ja teknologia  
Laitedokumentti  
Sähkötyöpaja 1/Kuntokatu 3



<input type="checkbox"/> Korjatun laitteet testaaminen		<input checked="" type="checkbox"/> Uuden rakennetun laitteen testaaminen	
Laite 13112014-2		Suojaluokka <input checked="" type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III	
Mallimerkintä Tyristorisuuntaaja "Luna"		Valmistaja SRa	
Nimellisjännite 400	Teho V 6900	Valmistusvuosi W 2014	
Jätetty	Korjattu/nimikirj.	Noudettu	
Vastuualue			
Tilaajan nimi		Puhelin	
Vikaselostus			
Työtilaus			
Myöhemmin sovitut työt			
Suoritetut työt Aistinvarainen tarkastus ja tarkastusmittaus laitteille 13112014 / 001.			
Tarkastus SFS-EN 61010-1:2011 mukaan soveltuvin osin.			
Korjausten jälkeiset tarkastukset (SFS-EN 60335-1:2009/ST 6 Sähkölaitekorjaajan opas): Aistinvaraisen tarkastuksen perusteella ovat kunnossa			
<input checked="" type="checkbox"/> Eristykset		<input checked="" type="checkbox"/> Kotelointi	
<input type="checkbox"/> Liitäntäkaapeli		<input type="checkbox"/> Suojajohdin	
Huomautuksia Laite ei sisällä kiinteitä liitäntäkaapeleita.			
	Vaadittu	Mitattu	
Suojajohdinpiirin vastus	0,100 Ω	0,064 Ω	<input checked="" type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Liian suuri <input type="checkbox"/> Ei tarvitse mitata
Eristysresistanssi	0,5 MΩ	>310 MΩ	<input checked="" type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Liian pieni <input type="checkbox"/> Ei tarvitse mitata
Vuotovirta	0,00002 mA	<0,5 mA	<input checked="" type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Liian suuri <input type="checkbox"/> Ei tarvitse mitata
Jännitekoe	kV	kV	<input type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Puutteellinen <input checked="" type="checkbox"/> Ei tarvitse mitata
Toimintakoe:	<input checked="" type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Puutteellinen		Merkinnät: <input checked="" type="checkbox"/> Kunnossa <input type="checkbox"/> Puutteelliset
Käytetty mittalaite	Mittalaitteen kalibrointipäivä		
Securest SIII	17.7.2013		
Huomautuksia Ylijännitekoetta ei suoritettu elektroniikan vuoksi.			
Kokeet suoritti 13.11.2014 MKo			
Päiväys	Tilaajan allekirjoitus		